



**Afonso Nunes Mexia Allen Revez**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Desenvolvimento de um sistema para o alinhamento do teto panorâmico de um veículo automóvel**

Orientador: Professor Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho, Professor Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António José Freire Mourão

Arguente: Prof. Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos

Vogal: Prof. Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro 2017**



**Afonso Nunes Mexia Allen Revez**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento de um sistema para o  
alinhamento do teto panorâmico de um  
veículo automóvel**

Orientador: Professor Doutor Alberto José Antunes Marques  
Martinho, Professor Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António José Freire Mourão

Arguente: Prof. Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos

Vogal: Prof. Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho

**Dezembro 2017**



**Desenvolvimento de um sistema para o alinhamento do teto panorâmico de um veículo automóvel**

**Copyright © 2017 Afonso Nunes Mexia Allen Revez, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

É com muito agrado, que em primeiro lugar, agradeço todo o apoio e orientação que recebi do meu orientador, Professor Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho. A sua ajuda e disponibilidade foram cruciais para o desenvolvimento desta dissertação.

Durante o período de conceção da dissertação, passei por momentos muito felizes, tal como por fases complicadas, que marcarão para sempre a minha vida. Gostaria, então, de agradecer a toda a minha família e amigos que me acompanharam e apoiaram no decorrer deste período.

Um especial obrigado aos meus pais, por me fornecerem todas as ferramentas para realizar este feito e por todo o apoio e amor que recebi ao longo da minha vida académica.

À minha irmã por toda a inspiração, força e ajuda que me ofereceu durante a escrita desta dissertação.

Agradeço a todos os meus colegas, agora amigos, que me acompanharam durante todo o meu período académico. Sem eles, estes cinco anos de teriam sido uma caminhada muito mais complicada.

A todo o Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologias um grande obrigado por todos os ensinamentos transmitidos ao longo do curso.





## Resumo

A presente dissertação tem como objetivo a concepção de um sistema para o alinhamento do teto panorâmico de um veículo automóvel. Pretende-se aumentar a cadência de produção de uma estação de trabalho de uma empresa do sector automóvel.

Uma das operações realizadas nesta estação de trabalho consiste na medição do desalinhamento existente entre o teto panorâmico e o tejadilho do veículo, seguida da anotação de todos os valores medidos e posterior correção do alinhamento. Atualmente, esta operação é executada de forma pouco eficiente e desconfortável por dois operários.

Neste trabalho projeta-se um sistema para realizar a medição do desalinhamento num tempo reduzido e indicar qual o ajuste que deve ser realizado, registando todos os valores numa base de dados.

Em suma, o projeto foi desenvolvido em três fases. A primeira fase consistiu numa pesquisa bibliográfica para identificar técnicas de medição do desalinhamento. Este estudo permitiu a comparação de instrumentos de medição e processamento de imagem. O método considerado mais adequado, e adotado neste projeto, consiste na utilização de comparadores digitais.

Na segunda fase do projeto, foram identificadas as equações que regem o alinhamento nos pontos de ajuste do teto panorâmico, partindo dos valores medidos pelos comparadores e por funções analíticas, resultantes da interpolação por *splines* cúbicos da curvatura do tejadilho do veículo. Foram também desenvolvidos programas em linguagem *MATLAB*, com o intuito de testar as equações obtidas e a serem incorporadas no sistema de alinhamento.

Na fase final do projeto, foi desenhado o suporte dos comparadores, escolhido o sistema que deslocará o suporte verticalmente e concebido o respetivo controlador.

Aceita-se que os objetivos propostos neste projeto foram alcançados e os resultados obtidos, nos ensaios e simulações realizados, foram positivos.

**Palavras-chave:** Automação, medição de um desalinhamento, técnicas de medição, processamento de imagem, simulação FluidSIM



## Abstract

The goal of this thesis is to develop a system that can be used in automobile production to automate the alignment of panoramic roofs. The aim of this system is to increase the vehicle production rate at an automotive company workstation.

One of the operations performed in this workstation involves measurement of the misalignment between the ceiling and the roof of the vehicle, and is followed by annotation of all measurements. This operation is currently executed in an inefficient and time-consuming way by two workers.

To address these issues, a system was designed to measure the misalignments in reduced time and indicate the value of the adjustments that must be applied, recording all values in a database.

Briefly, this project was developed in three stages. First, different measuring misalignment techniques were identified through a literature review. Measurement and image processing instruments were compared. Of all the methods analysed, the use of digital comparators was considered the most suitable and was selected for this project.

Second, the alignment equations referring to the adjustments of the panoramic roof were finalised, starting with values measured by the comparators and analytic functions interpolated by cubic splines from the curvature of the vehicle's roof. Additionally, scripts were developed in *MATLAB*, to test these equations and to apply them in the final system.

Third, the digital indicator's holder was designed, the system that shifts the support vertically was selected and its controller was developed.

To conclude, all the goals proposed in this project were accomplished and the results of all tests and simulations were positive.

**Keywords:** Automation, misalignment measurement, measuring techniques, image processing, FluidSIM simulation



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.3	Estrutura da dissertação .....	2
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>3</b>
2.1	Automação Industrial .....	3
2.2	Métodos de medição .....	4
2.2.1	Instrumentos de medição .....	4
2.2.2	Processamento de imagem .....	12
<b>3</b>	<b>Medição do desalinhamento .....</b>	<b>19</b>
3.1	Solução atual .....	19
3.2	Parâmetros de projeto .....	21
3.3	Medição por instrumentos de medição .....	23
3.4	Aplicação do processamento de imagem .....	24
3.5	Comparação entre a medição por comparadores e por processamento de imagem .....	25
<b>4</b>	<b>Processamento dos valores medidos .....</b>	<b>27</b>
4.1	Determinação das funções analíticas de alinhamento .....	27
4.1.1	Simbologia .....	28
4.1.2	Equações de alinhamento do teto, com o mesmo e o tejadilho planos .....	29
4.1.3	Equações de alinhamento do teto panorâmico, constituído por um vidro .....	38
4.1.4	Equações de alinhamento finais do teto panorâmico .....	56
4.2	Programação e verificação das equações de alinhamento obtidas .....	68
4.2.1	Análise dos resultados obtidos .....	77
<b>5</b>	<b>Desenvolvimento do suporte de comparadores .....</b>	<b>79</b>
5.1	Escolha do sistema de deslocamento vertical do suporte de comparadores .....	79
5.1.1	Sistema de acionamento por veio roscado .....	79
5.1.2	Sistema de acionamento pneumático ou hidráulico .....	80

5.1.3	Sistema de transmissão por corrente .....	80
5.1.4	Sistema de acionamento por atuador linear elétrico .....	80
5.1.5	Comparação dos sistemas e escolha do mais adequado.....	80
5.2	Desenho do suporte de comparadores.....	81
5.2.1	Escolhas do material e do perfil da estrutura do suporte.....	82
5.2.2	Escolha dos comparadores .....	82
5.2.3	Conceção do suporte de comparadores .....	83
5.2.4	Desenvolvimento da peça de suporte dos comparadores .....	86
5.2.5	Escolha dos atuadores pneumáticos .....	87
5.2.6	Desenvolvimento do quadro superior .....	88
5.2.7	Desenvolvimento do controlador do sistema pneumático.....	91
<b>6</b>	<b>Conclusões e proposta de trabalho futuro .....</b>	<b>95</b>
6.1	Conclusões .....	95
6.2	Trabalho futuro .....	96
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>97</b>
	<b>Anexo A – Programa Matlab “proc_img.m”.....</b>	<b>99</b>
	<b>Anexo B – Programa Matlab “alinhamento_plano.m” .....</b>	<b>101</b>
	<b>Anexo C – Funções de aproximação em Matlab .....</b>	<b>103</b>
	<b>Anexo D – Programa Matlab “alinhamento.m” .....</b>	<b>105</b>
	<b>Anexo E – Restantes funções de aproximação em Matlab .....</b>	<b>107</b>
	<b>Anexo F – Programa Matlab “ajuste.m” .....</b>	<b>109</b>
	<b>Anexo G – Tabela do fornecedor Chagas para tubo estrutural laminado a quente quadrado..</b>	<b>113</b>
	<b>Anexo H – Tabelas do fornecedor Mitutoyo de comparadores digitais .....</b>	<b>115</b>
	<b>Anexo I – Tabelas do fornecedor Rexroth das guias .....</b>	<b>117</b>
	<b>Anexo J – Tabelas do fornecedor Parker dos atuadores pneumáticos.....</b>	<b>119</b>
	<b>Anexo L – Desenhos Técnicos .....</b>	<b>123</b>

# Índice de Figuras

Figura 2-1: Comparador Digital, [5] .....	5
Figura 2-2: Sensor Indutivo .....	6
Figura 2-3: Sensor de distância laser, [8].....	8
Figura 2-4: Princípio de funcionamento de um sensor ultrassônico .....	9
Figura 2-5: Tejadilho e teto panorâmico do veículo .....	14
Figura 2-6: Resultado obtido pelo Filtro de Sobel.....	14
Figura 2-7: Resultado obtido pelo Operador de Prewitt .....	15
Figura 2-8: Resultado obtido pelo Operador de Roberts .....	16
Figura 2-9: Resultado obtido pelo Operador Laplaciano .....	17
Figura 2-10: Resultado obtido pelo Filtro de Canny.....	17
Figura 3-1: Teto panorâmico .....	19
Figura 3-2: Pontos de medição do desalinhamento atual.....	20
Figura 3-3: Fluxograma das operações da estação de trabalho.....	22
Figura 4-1: Identificação dos pontos de medição e de ajuste com teto e tejadilho planos.....	28
Figura 4-2: Inclinações do tejadilho e do teto em torno do eixo dos yy .....	31
Figura 4-3: Inclinações do tejadilho e do teto em torno do eixo dos xx .....	31
Figura 4-4: Inclinação do teto relativamente ao tejadilho (Pano X'O'Z') .....	32
Figura 4-5: $\Delta x=0$ .....	33
Figura 4-6: $\Delta x \in \mathbb{R}$ .....	34
Figura 4-7: Inclinação do teto relativamente ao tejadilho (Pano Y'O'Z') .....	35
Figura 4-8: $\Delta y = 0$ .....	35
Figura 4-9: $\Delta y \in \mathbb{R}$ .....	36
Figura 4-10: Projeção tridimensional do tejadilho.....	38
Figura 4-11: Aproximações polinomiais da função da Runge, [13] .....	39
Figura 4-12: Identificação dos pontos de medição e de ajuste com teto e tejadilho com curvatura .....	39
Figura 4-13: Identificação das funções .....	40

Figura 4-14: Pontos da função $z_3(x)$ .....	41
Figura 4-15: Pontos da função $z_1(y)$ (vista isométrica) .....	45
Figura 4-16: Pontos da função $z_1(y)$ (vista lateral).....	46
Figura 4-17: Pontos da função $z_2(x)$ (vista isométrica) .....	47
Figura 4-18: Pontos da função $z_2(x)$ (alçado principal).....	47
Figura 4-19: Pontos da função $z_4(x)$ (vista isométrica) .....	48
Figura 4-20: Pontos da função $z_4(x)$ (alçado posterior).....	48
Figura 4-21: Pontos da função $z_5(x)$ (vista isométrica) .....	49
Figura 4-22: Pontos da função $z_5(x)$ (alçado posterior).....	49
Figura 4-23: Representação da inclinação de uma aproximação de $z_1(y)$ .....	51
Figura 4-24: Diferença entre uma reta inclinada de uma curva inclinada .....	53
Figura 4-25: Efeitos de uma inclinação na componente vertical da constante de curvatura.....	54
Figura 4-26: Identificação dos pontos de medição e de ajuste do teto e tejadilho .....	57
Figura 4-27: Identificação das funções finais .....	58
Figura 4-28: Pontos da função $z_7(x)$ (vista isométrica) .....	59
Figura 4-29: Pontos da função $z_7(x)$ (alçado principal).....	59
Figura 4-30: Pontos da função $z_8(x)$ (vista isométrica) .....	60
Figura 4-31: Pontos da função $z_8(x)$ (alçado principal).....	60
Figura 4-32: Inclinação do vidro frontal do teto relativamente ao tejadilho (Pano $Y'O'Z'$ ) .....	64
Figura 4-33: Modelo tridimensional da superfície do teto e tejadilho planos.....	69
Figura 4-34: Modelo tridimensional da superfície do teto e tejadilho com curvatura .....	70
Figura 4-35: Modelo tridimensional da superfície do teto e tejadilho do veículo automóvel.....	70
Figura 5-1: Comparador escolhido .....	83
Figura 5-2: Guia Rexroth R1027 230 44, [17].....	85
Figura 5-3: Estrutura do suporte sem partes adicionais .....	85
Figura 5-4: Estrutura do suporte com partes adicionais.....	86
Figura 5-5: Modelo tridimensional da peça de suporte de comparadores.....	87



Figura 5-6: Modelo tridimensional da peça de suporte das guias .....	89
Figura 5-7: Modelo tridimensional do quadro superior do suporte de comparadores .....	90
Figura 5-8: Modelo tridimensional do suporte de comparadores .....	91
Figura 5-9: Sistema hidráulico após o botão B1 ser pressionado .....	92
Figura 5-10: Sistema hidráulico após o botão B2 ser pressionado .....	93



## Índice de tabelas

Tabela 2-1: Análise comparativa dos instrumentos de medição .....	10
Tabela 3-1: Cotas nominais e tolerâncias dos pontos para alinhamento do teto.....	21
Tabela 4-1: Simbologia.....	28
Tabela 4-2: Pontos da função $z_3(x)$ .....	42
Tabela 4-3: Segundas derivadas da função $z_3(x)$ .....	43
Tabela 4-4: Pontos retirados para $z_1(y)$ .....	46
Tabela 4-5: Pontos retirados para $z_2(x)$ .....	47
Tabela 4-6: Pontos retirados para $z_4(x)$ .....	48
Tabela 4-7: Pontos retirados para $z_5(x)$ .....	49
Tabela 4-8: Simbologia de constantes essenciais.....	50
Tabela 4-9: Pontos retirados para $z_7(x)$ .....	59
Tabela 4-10: Pontos retirados para $z_8(x)$ .....	60
Tabela 4-11: Atualização da simbologia para o caso final .....	62
Tabela 4-12: Resultados obtidos no primeiro teste realizado do primeiro modelo.....	72
Tabela 4-13: Resultados obtidos no segundo teste realizado do primeiro modelo .....	72
Tabela 4-14: Resultados obtidos no terceiro teste realizado do primeiro modelo .....	73
Tabela 4-15: Resultados obtidos no primeiro teste realizado do segundo modelo .....	73
Tabela 4-16: Resultados obtidos no segundo teste realizado do segundo modelo.....	74
Tabela 4-17: Resultados obtidos no terceiro teste realizado do segundo modelo.....	74
Tabela 4-18: Resultados obtidos no primeiro teste realizado do terceiro modelo .....	75
Tabela 4-19: Resultados obtidos no segundo teste realizado do terceiro modelo.....	76
Tabela 4-20: Resultados obtidos no terceiro teste realizado do terceiro modelo.....	76



## Introdução

### 1.1 Motivação

Devido à atual crise económica e à grande competitividade entre empresas no setor industrial, é essencial garantir linhas de produção e de montagem eficazes e eficientes. Para tal, existe a necessidade de minimizar o tempo de produção e de montagem, com o intuito de aumentar a produtividade. Assegurar uma boa qualidade do produto, para dar resposta ao mercado competitivo. E, reduzir os custos de produção, para maximizar os lucros da empresa.

Com isto dito, é possível verificar que existe um grande aumento no investimento tecnológico, no setor industrial, com o propósito de alcançar a eficiência pretendida. Isto porque, através de uma linha de produção automatizada, não só é possível produzir um número elevado de peças, como se garante a boa e constante qualidade das mesmas. Verifica-se que os custos de automatização se concentram no investimento inicial e na manutenção dos autómatos, [1].

Assim, com o intuito de promover a eficiência das linhas de produção e de montagem, torna-se essencial que as empresas acompanhem o desenvolvimento tecnológico e automatizem as mesmas.

### 1.2 Objetivos

A presente dissertação visa o desenvolvimento de um sistema capaz de dar resposta a um problema que existe atualmente na linha de montagem de uma empresa do setor automóvel. Com o objetivo de acelerar o processo de montagem de um teto panorâmico em dois dos modelos (veículos automóveis) fabricados pela empresa, este sistema tem de:

1. Medir o desalinhamento entre o teto panorâmico e a carroçaria do veículo, resultante da montagem prévia do teto;
2. De acordo com os valores medidos do desalinhamento, calcular qual o acerto necessário para alinhar o teto panorâmico com a carroçaria;
3. Registrar os valores obtidos numa base de dados e indicar aos operários da estação do processo de alinhamento do teto e qual o ajuste a realizar.

É importante automatizar este processo de medição, uma vez que se encontram atualmente dois operários a medir o desalinhamento com o auxílio de um relógio comparador. Desta maneira, o processo é demorado, sendo executado entre dois a três minutos, está sujeito a eventuais erros humanos e o posicionamento do comparador varia de medição para medição, tratando-se de um método pouco preciso. É ainda importante referir, que o teto panorâmico é composto por dois vidros e, atualmente, é realizada a medição do desalinhamento em seis pontos, para garantir que este fique perfeitamente alinhado com a carroçaria, com o intuito de beneficiar a aerodinâmica das viaturas.

Para que seja possível desenvolver um sistema automatizado capaz de medir o desalinhamento, é necessário numa primeira fase da dissertação, proceder com a escolha do método de medição mais adequado para a situação. E, de seguida, desenvolver o suporte onde serão instalados os instrumentos que realizarão a medição. Caso a medição seja realizada por instrumentos de contato, tem-se o cuidado adicional para que o suporte não risque nem danifique a superfície da carroçaria do veículo.

O sistema automatizado será fixado na parte superior da estação de trabalho, isto é, no teto da instalação e irá realizar a medição na vertical de cima para baixo. Uma vez que o objetivo principal é o alinhamento de um teto panorâmico relativamente à carroçaria do veículo, o sistema automatizado tem de estar preparado para medir o desalinhamento de duas superfícies que, neste caso, têm curvatura.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se estruturada de maneira a garantir uma sequência coerente e está repartida em seis capítulos:

- No capítulo 1 faz-se uma apresentação no âmbito da dissertação, onde são apresentados os objetivos, a motivação e a respetiva estrutura da dissertação.
- No capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica relativa aos instrumentos e a alguns conceitos necessários para a realização do projeto.
- No capítulo 3 comparam-se os instrumentos possíveis de serem utilizados.
- No capítulo 4 são desenvolvidas as equações de alinhamento que serão utilizadas para o processamento dos valores obtidos por medição.
- No capítulo 5 descreve-se o sistema desenvolvido.
- No capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais do projeto realizado e propostas de trabalho futuro.

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é discutida a importância e as vantagens da automatização de processos industriais, face ao atual problema existente na montagem de um teto panorâmico numa empresa do setor automóvel. Posteriormente, como o objetivo deste projeto é corrigir potenciais desalinhamentos existentes na montagem de um teto panorâmico, é essencial conhecer os diversos métodos de medição que poderão vir a ser utilizados neste projeto.

### 2.1 Automação Industrial

Face à atual concorrência entre empresas, é essencial um investimento tecnológico que permita aumentar a eficiência e maximizar a produção. Daqui, resulta a importância da automação industrial para as empresas, uma vez que o seu objetivo consiste no melhoramento do desempenho da linha de produção e de montagem, com o recurso a sistemas automatizados.

Os autómatos têm a capacidade de realizar ciclos de produção com o máximo de precisão, a uma velocidade constante e elevada, levando então a um aumento da produtividade. Devido à capacidade de fornecer resultados consistentes, é possível obter uma melhoria da qualidade do produto, visto que podem ser cuidadosamente regulados e controlados, e eliminam a possibilidade de existir erros humanos.

Embora numa primeira fase tenha de existir um maior investimento na aquisição dos autómatos, existe uma redução dos custos, devido ao fato destes serem concebidos para realizar as suas funções de maneira a maximizar a sua produtividade e a minimizar desperdícios. Por outro lado, como é possível satisfazer os requisitos funcionais recorrendo a sistemas automatizados, obtém-se, por consequência, a redução do número de operários que colabora para a redução de custos. Assim, a longo prazo, existirá retorno sobre o investimento inicial.

De outra perspetiva, a automação industrial previne erros humanos cometidos quando a operar uma máquina, reduzindo, por consequência, eventuais acidentes e aumentando a segurança, [2].

## **2.2 Métodos de medição**

Numa primeira fase deste subcapítulo, apresentam-se diferentes instrumentos de medição e faz-se uma comparação, para escolher o mais adequado para realizar a medição do desalinhamento. De seguida, é apresentado outro método de medição que recorre a processamento de imagem e são identificadas as suas vantagens e desvantagens relativamente à medição convencional.

Existem vários fatores a ter em consideração na escolha dos instrumentos de medição mais adequado, nomeadamente aspetos relacionados com a leitura e processamento de dados, a realizar após as medições. Todos esses fatores, tal como o seguimento lógico por de trás de todas as decisões tomadas, estão apresentados neste subcapítulo.

Uma vez que os dados obtidos da medição têm de ser processados, para obter o valor de ajuste necessário para o alinhamento do teto panorâmico, é necessário converter o valor do desalinhamento num sinal elétrico. Para este efeito, optou-se por utilizar transdutores de posição e sensores de distância, que apenas diferem na metodologia utilizada durante a medição. Enquanto os transdutores, entram em contacto com a superfície a ser medida, os sensores de distância, tal como o nome indica, realizam a medição à distância. Tem de se ter em conta cuidados adicionais com os sensores de distância, visto que o teto panorâmico é maioritariamente constituído por vidro, o que poderá vir a trazer problemas durante a medição.

A técnica de medição baseada no processamento de imagem difere dos instrumentos de medição, visto que utiliza captação de imagem e realiza uma medição indireta após tratamento e processamento da mesma.

De seguida, são estudadas as vantagens e as desvantagens dos transdutores de posição e de vários tipos de sensores à distância.

Após a escolha do instrumento de medição, faz-se um estudo do princípio de funcionamento do processamento de imagem e apresentam-se os vários tipos de operadores, que poderão ser utilizados.

A comparação e escolha final do método de medição é realizada após o estudo da aplicação dos mesmos no projeto, descrito no capítulo 3 (Medição do desalinhamento).

### **2.2.1 Instrumentos de medição**

Como referido anteriormente, é agora apresentado o princípio de funcionamento dos transdutores de posição, seguido da apresentação dos vários tipos de sensores de distância que poderão ser utilizados neste projeto. Numa fase final, é efetuada uma comparação dos instrumentos de medição apresentados.



### 2.2.1.1 Transdutores de posição

Um transdutor é um equipamento que converte variações de uma determinada grandeza física de um sinal, noutra grandeza, de maneira a permitir a realização de uma medição. No caso em estudo, o transdutor de posição converte variações de movimento num sinal de saída elétrico, [3].

Um transdutor de posição é composto por duas partes, sendo uma fixa num sistema de referência no espaço e a outra móvel. A posição da parte móvel corresponde ao valor da medição. Como está descrito posteriormente, a parte fixa pode ou não representar a origem da medição.

Existem diferentes tipos de transdutores de posição, que podem ser classificados por: lineares ou rotativos; analógicos ou digitais; absolutos, incrementais ou incrementais-absolutos, [4]. Os lineares, tal como o nome indica, realizam medições diretas ao longo de uma linha reta, e os rotativos, ao longo de uma rotação. Como a medição do desalinhamento do teto é realizada verticalmente, opta-se por usar transdutores de posição linear. Num transdutor analógico a diferença de potencial do sinal elétrico à saída varia com a medição, enquanto nos digitais, a saída corresponde a um número representado por bits. Neste trabalho, o mais conveniente é a utilização de um transdutor digital, para não existir a necessidade adicional de converter o sinal obtido. Porém, ambas as variáveis podem ser utilizadas, sendo a escolha realizada tendo em conta os custos. Finalmente, os transdutores absolutos realizam a medição, respeitando sempre a mesma origem, indicando sempre a posição absoluta. Enquanto nos incrementais a origem pode variar e o valor final obtido resulta de uma medição indireta entre a origem e a variação da posição da parte móvel do transdutor.

Tendo em conta o que foi referido e admitindo possíveis valores para os desalinhamentos, uma vez que estes são, hoje em dia, medidos a olho, concluiu-se que o transdutor de posição ideal para o projeto seria um comparador digital com saída digital dos valores medidos (Figura 2-1).



Figura 2-1: Comparador Digital, [5]

Os comparadores digitais têm a vantagem de serem de pequeno porte, facilitado a sua instalação no sistema de alinhamento. Estes instrumentos têm resoluções que variam entre o micrómetro e a décima de micrómetro. A precisão do alinhamento do teto de abrir com a carroçaria da viatura é essencial, para assegurar boas condições de aerodinâmica da viatura. Existe ainda a vantagem destes aparelhos requererem poucas recalibrações. Porém, apresentam a desvantagem, de serem sensíveis à sujidade e ao pó sobre a superfície cuja posição se pretende medir.

### 2.2.1.2 Sensores à distância

Existem três formas de realizar uma medição dimensional à distância: por indução eletromagnética, por radiação ou por emissão sonora. Tal como os transdutores de posição, os três métodos referidos convertem a variação da posição num sinal elétrico.

#### Indução Eletromagnética

Pela medição por indução eletromagnética utilizam-se sensores indutivos capazes de detetar objetos metálicos a pequenas distâncias, [6]. Um sensor indutivo é constituído por um amplificador, um disparador Schmitt, um circuito oscilador e por uma bobina.

O amplificador amplia a tensão do sinal de entrada e o disparador Schmitt, que se trata de um circuito comparador, previne o ruído no sinal ampliado. O circuito oscilador torna o sinal de saída do disparador Schmitt num sinal eletrónico repetitivo com uma frequência constante. Este sinal passa pela bobina, que cria um campo eletromagnético [7]. Na seguinte figura (Figura 2-2) ilustra um esquema simplificado, da configuração de um sensor indutivo.

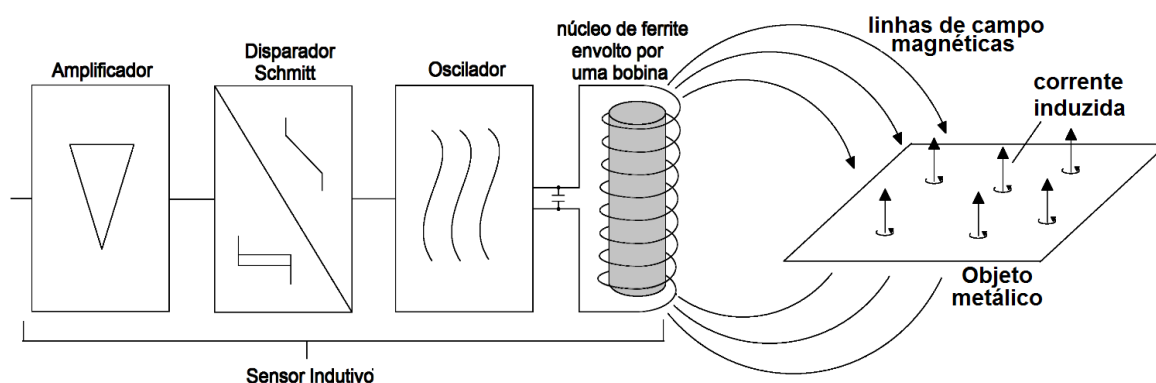


Figura 2-2: Sensor Indutivo

Quanto ao seu funcionamento, como ilustrado, o sensor cria um campo eletromagnético variável que é refletido quando um material metálico o atravessar. A indução no metal provoca uma redução da energia do campo que, por sua vez, diminui a amplitude do sinal do oscilador. Dependendo da variação da amplitude, sabe-se qual a distância entre o sensor e o metal.

Este método tem a desvantagem de apenas realizar a medição se o objeto alvo for metálico. Se se pretender medir a distância entre o sensor e um objeto não metálico, é necessário agregar um metal ou uma fita metálica ao objeto. Visto que a parte superior do teto panorâmico é de vidro, seria necessário colar uma fita metálica ao mesmo.

### **Radiação**

Também é possível realizar a medição à distância através de radiação. Para este tipo de medição, podem ser utilizados vários tipos de radiação<sup>1</sup>, porém, o princípio de funcionamento é equivalente para todos. Na medição de distância por radiação, é emitido um feixe de luz que será refletido no objeto. Conhecendo a velocidade da luz e o tempo de trajeto, obtém-se a distância do objeto ao sensor. Respeitando a seguinte função:

$$v = \frac{\partial s}{\partial t} \Leftrightarrow s = \int_0^t v \cdot dt \quad (1)$$

Onde:

- $v$  = velocidade da luz ( $\approx 3 \times 10^8$  m/s);
- $s$  = distância entre o sensor e o objeto (m);
- $t$  = tempo que o feixe de luz demora a ir do sensor até ao objeto e voltar (s).

Assim, conclui-se que se trata de uma medição indireta, onde a distância é calculada com base no “tempo de voo” do feixe de luz. A seguinte figura (Figura 2-3) ilustra o princípio de funcionamento que acabou de ser referido:

---

<sup>1</sup> Os tipos de radiação mais utilizados para medição de distâncias são a laser e a infravermelhos.

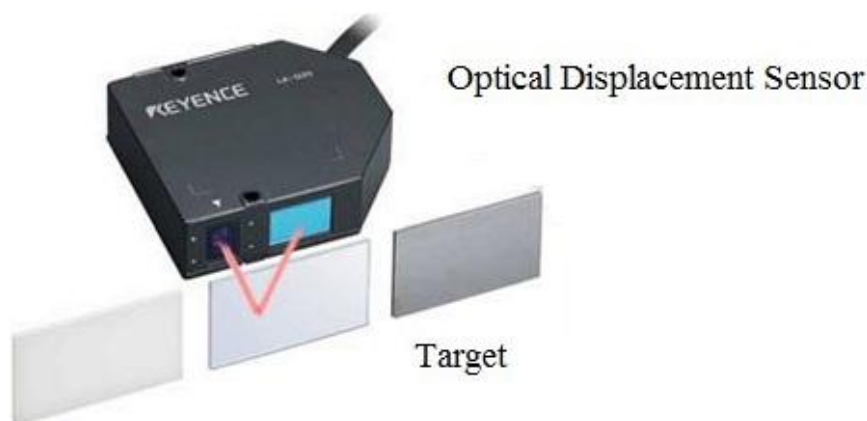


Figura 2-3: Sensor de distância laser, [8]

Através da figura anterior (Figura 2-3), também se pode verificar que estes tipos de sensores são compostos por duas partes: um emissor e um recetor. Como se encontram próximos, o emissor emite um feixe de radiação com um pequeno ângulo, de maneira a que o feixe atinja o recetor após ser refletido. Quanto maior for o ângulo, menor terá de ser a distância do sensor ao objeto, isto é, menor será o alcance do sensor.

Embora este método seja eficaz e necessite de pouca manutenção apresenta limitações para a utilização no projeto em desenvolvimento. A parte superior do teto panorâmico é maioritariamente composta por vidro, o que poderá levar a erros na medição, devido a reflexão do feixe. Por outro lado, utiliza um circuito sensível a pequenas variações, o que permite realizar medições com uma boa resolução, mas com uma baixa precisão, devido à estabilidade do instrumento.

### **Emissão Sonora**

O princípio de funcionamento da medição por emissão sonora é muito semelhante à medição por radiação. O sensor também é constituído por um emissor e um recetor e também realiza a medição com base num “tempo de voo”, porém é emitido um ultrassom em vez de um feixe de luz. Depois de emitido, o ultrassom é refletido no objeto e, conhecendo o valor da velocidade de propagação do som e o tempo que a onda sonora demorou a ser refletida, obtém-se a distância entre o sensor e o objeto, [9].

A seguinte figura (Figura 2-4) ilustra o princípio de funcionamento de um sensor ultrassónico.

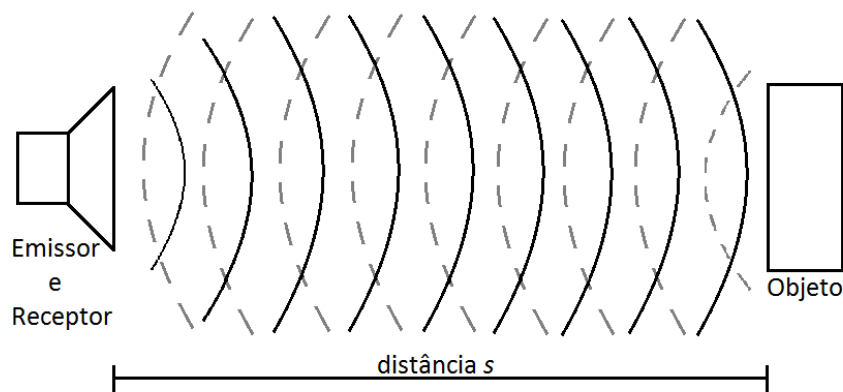


Figura 2-4: Princípio de funcionamento de um sensor ultrassônico

Através deste método, a distância também é calculada respeitando a equação 1, em que:

- $v$  = velocidade de propagação do som no ar ( $\approx 340$  m/s);
- $s$  = distância entre o sensor e o objeto (m);
- $t$  = tempo que a onda sonora demora a ir do sensor até ao objeto e voltar (s).

Para melhorar a precisão na medição, é necessário conhecer o valor da temperatura do ar de onde a mesma é realizada. Isto porque, a velocidade do som depende da densidade do ar, e a densidade depende da temperatura. Para a temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ , a velocidade de propagação ronda os 343 m/s e a  $25^{\circ}\text{C}$ , a velocidade corresponde a 346,3 m/s, [11].

Este método tem uma vantagem importante relacionada com o fato de qualquer superfície sólida rígida refletir ultrassons. Porém, trata-se de ser um método pouco preciso, devida a instabilidade do instrumento de medição.

### 2.2.1.3 Análise comparativa dos instrumentos de medição

Conhecidos os diferentes tipos de instrumentos de medição, é necessário realizar uma análise comparativa para proceder à escolha do sistema mais adequado para a medição do desalinhamento do teto panorâmico. Esta análise tem em conta tudo o que foi referido anteriormente e são ainda destacadas todas as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos de medição. Na tabela 2-1 resumem-se as vantagens e as desvantagens dos vários tipos de técnicas de medição para facilitar a comparação.

Tabela 2-1: Análise comparativa dos instrumentos de medição

<b>Tipo de medição</b>	<b>Método de medição</b>	<b>Breve descrição</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Por contacto</b>	Transdutor de Posição	Realiza a medição por contacto no objeto e converte para um sinal elétrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muito utilizado no setor industrial</li> <li>Elevada precisão e resoluções muito pequenas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sujidade e pó podem afetar a medição</li> </ul>
	Indução Eletromagnética	Utiliza indução eletromagnética para descobrir a distância a um objeto metálico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necessita de pouca manutenção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>É necessário a adição de uma película metálica ao vidro para que seja possível realizar a medição</li> </ul>
<b>À distância</b>	Radiação	Emite um feixe de luz que é refletido no objeto. Conhecendo o valor da velocidade da luz e o tempo que o feixe demorou a ir e voltar, obtém-se a distância do objeto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medição precisa e rápida</li> <li>Utilizada no setor industrial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O teto panorâmico é maioritariamente composto de vidro, dificultando a reflexão do feixe de luz e consequentemente a medição</li> </ul>
	Emissão Sonora	Semelhante à medição por radiação, porém é emitido um ultrassom em vez de um feixe de luz	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qualquer tipo de sujidade ou pó não afetam a medição</li> <li>Muito utilizado no setor industrial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Velocidade da propagação do ar depende da temperatura ambiente do local da medição</li> <li>Pouco preciso</li> </ul>

Considerando que o teto panorâmico é maioritariamente composto por vidro, rejeita-se, à partida, a medição por radiação. Como referido, esta dificuldade poderia ser contornada com a adição de

elementos metálicos sobre a superfície. Solução esta que aumenta os custos fixos e o tempo de montagem.

Embora a medição por emissão sonora tenha o inconveniente relacionado com a densidade do ar, este problema pode ser minimizado com a adição de um termómetro e de um medidor de humidade ao autómato e criar uma relação entre a temperatura e a humidade ambiente e a velocidade do ar.

Seguindo o mesmo raciocínio, afasta-se também a hipótese de realizar a medição por indução eletromagnética, visto que a inclusão de elementos metálicos sobre a superfície corresponde a um procedimento adicional que se pretende evitar.

Conclui-se que a melhor opção para a realização da medição à distância é a medição por emissão sonora, visto que se reduz o tanto o tempo de produção, como os custos fixos da linha de montagem. Resta agora realizar uma comparação entre a medição à distância e por contacto, focando especificamente nas vantagens e desvantagens dos comparadores e dos sensores ultrassónicos.

Na medição à distância não é necessário que os sensores entrem em contacto com teto panorâmico ou com a carroçaria do veículo. Nestas condições não é necessário que o sistema apresente partes móveis. Por outro lado, na medição por contacto, é fundamental que o suporte de sensores tenha movimento vertical de maneira a garantir o contacto correto dos sensores com o teto panorâmico e com a carroçaria. Este aspeto revela-se como uma desvantagem para a medição por contacto, uma vez que o custo do suporte de sensores, é superior ao utilizado na medição à distância.

Porém, devida a instabilidade dos sensores ultrassónicos, a precisão destes instrumentos é fortemente afetada, podendo sofrer desvios até 1 mm. Atualmente, existem inúmeros sensores ultrassónicos à venda no mercado e, quanto maior for a sua precisão, maior o seu custo. Isto é uma grande desvantagem para os sensores ultrassónicos, visto que o custo é muito elevado quando se pretende obter uma precisão semelhante à resolução necessária. O custo dos sensores é tão elevado, que pode facilmente ultrapassar o custo total do projeto caso a medição seja realizada com comparadores. Ambas as opções são possíveis, contudo, a fim de reduzir os custos de projeto, procede-se com os comparadores, como escolha do instrumento mais adequado para medição do desalinhamento entre o teto panorâmico e a carroçaria dos veículos.

### 2.2.2 Processamento de imagem

Tal como referido anteriormente, é agora apresentado um método alternativo para realizar a medição do desalinhamento. Este método, ao contrário do convencional, que utiliza instrumentos concebidos para realizar medições de distâncias, recorre a captações de imagens e maioritariamente a tratamento e processamento computacional das mesmas.

Através deste método são captadas imagens bidimensionais do objeto e posteriormente tratadas de maneira a excluir quaisquer parâmetros redundantes e para auxiliar o processamento. Após a sua captação, as imagens são definidas por uma matriz de pixéis cuja a dimensão estabelece a resolução da imagem. Quanto maior for a matriz, mais pixéis irão existir e maior será a resolução e o detalhe da imagem.

Cada pixel da imagem corresponde a um elemento da matriz e são caracterizados pelas suas coordenadas  $(x,y)$  e pela intensidade das cores, que depende do tipo de imagem com que se está a trabalhar. Existem vários tipos de imagens: binárias, indexadas, neutras, RGB, etc. Caso se esteja a trabalhar com uma imagem binária, existem apenas duas cores: preto e branco. O preto corresponde a todos os elementos da matriz com valor nulo, e o branco a todos com valor equivalente a 1. Com mais detalhe, existem imagens com apenas cores neutras (imagem a preto e branco), o valor da intensidade varia entre o 0 e 255, onde o 0 corresponde ao preto e quanto maior for o valor, maior é a claridade do cinzento, até atingir 255 que corresponde ao branco. Caso a imagem seja a cores (RGB), cada elemento da matriz corresponde a um vetor de três elementos e estes podem assumir valores entre 0 e 255. RGB é a abreviatura do sistema de cores “Red Green Blue”, traduzindo, vermelho, verde e azul. O primeiro elemento do vetor corresponde à intensidade do vermelho, o segundo, à intensidade do verde e, o último elemento, ao azul. Com a mistura destas três cores, é possível obter um espectro de cores com mais de 16 milhões diferentes de combinações de tons. O RGB é um sistema de cores aditivas, logo quando três elementos do vetor equivalem a 255, obtém-se a cor branca. Caso sejam nulos, obtém-se o preto.

Como referido, após a sua captação, existem muitos detalhes irrelevantes na imagem. Tendo em conta que o objetivo do autómato é realizar medições de distâncias, pormenores, como as cores de cada pixel, ou a intensidade do cinzento são desnecessários. Para tal, a imagem necessita de ser tratada de maneira a simplificar o processamento. Visto que se pretende medir a distância entre duas superfícies recorrendo a uma imagem, apenas é necessário os contornos que delimitam as mesmas. Para tal, utiliza-se uma técnica de processamento de imagem, que determina os pontos onde existe uma mudança repentina da intensidade luminosa, designada por detecção de borda.

Para aplicar a detecção de borda, podem ser utilizados variados tipos de operadores de gradiente. Através dos operadores de gradiente são descobertos os máximos e mínimos da primeira derivada da matriz que define a imagem. Assim, todas as grandes variações de intensidade da imagem são detetadas e



localizadas. Após aplicar um filtro de gradiente, os pixels cujo gradiente ultrapasse um limite definido pelo operador, estarão localizados num contorno ou orla. Sendo então possível identificar todos os pixels que definem uma grande variação de intensidade. O gradiente da matriz imagem original  $f(x,y)$  é calculado através da seguinte expressão:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Neste projeto, foram utilizados os operadores de gradiente mais conhecidos e disponíveis no programa MATLAB, sendo estes o:

- Filtro de Sobel,
- Operador de Roberts,
- Operador de Prewitt
- Operador Laplaciano e o
- Filtro de Canny

O princípio de funcionamento dos operadores é muito semelhante. É calculado o gradiente da intensidade de imagem em cada ponto e obtém-se tanto o valor da variação da intensidade do claro para o escuro, tal como a direção em que ocorre essa variação. Assim, são identificadas as variações de intensidade existentes na imagem original e são detetados os contornos.

Com o intuito de destacar as diferenças de cada operador, são aplicados os diferentes filtros a uma imagem do teto panorâmico (Figura 2-5). Trata-se de uma boa imagem para testar os filtros visto ser de baixa qualidade. Assim, tira-se conclusões relativas a como cada filtro lida com o ruído existente.

As imagens resultantes da aplicação de cada um dos operadores foram obtidas através de um programa desenvolvido em MATLAB (`pro_img.m` - Anexo A). Este programa, está preparado para realizar o processo de detecção de borda a qualquer tipo de imagem. Antes de serem aplicados os filtros, a imagem é convertida para escalas de cinzento (preto e branco) através da função `rgb2gray`. Após a conversão, são aplicados os filtros e a imagem é apresentada para análise comparativa. Tal como referido anteriormente, todos os pixels localizados num contorno ou orla, ultrapassaram um limite que pode ser definido pelo utilizador. Porém, nos resultados obtidos pelo programa, não foi efetuada qualquer alteração à sensibilidade do filtro ao ruído. Isto é, os operadores foram utilizados com a sensibilidade padrão definida pelo MATLAB.



Figura 2-5: Tejadilho e teto panorâmico do veículo

### 2.2.2.1 Filtro de Sobel

O filtro de Sobel é um operador de gradiente que utiliza duas matrizes 3x3 que são convoluídas com a matriz da imagem original (A). Daqui, resultam duas aproximações dos gradientes nas direções x e y ( $G_x$  e  $G_y$ ). Onde:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times A \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \times A \quad (3)$$

E assim, através destas aproximações, calcula-se o valor da magnitude (G) e da direção ( $\Theta$ ) em que ocorre a variação de intensidade. Na Figura 2-6 está apresentado o resultado da Figura 2-5 após ser tratada pelo filtro de Sobel.

- $G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$  (4)
- $\Theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$  (5)



Figura 2-6: Resultado obtido pelo Filtro de Sobel

### 2.2.2.2 Operador de Prewitt

Muito semelhante ao filtro de Sobel, o operador de Prewitt recorre a duas máscaras com dimensões 3x3 (6), para calcular o valor da magnitude e da direção. Este operador utiliza máscaras mais simples de implementar do que Sobel, porém é mais sensível ao ruído.

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times A \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \times A \quad (6)$$

Tanto a magnitude, como a direção são obtidas através das mesmas expressões utilizadas no filtro de Sobel (4 e 5). Na Figura 2-7 está apresentado o resultado da Figura 2-5 após ser tratada pelo operador de Prewitt.

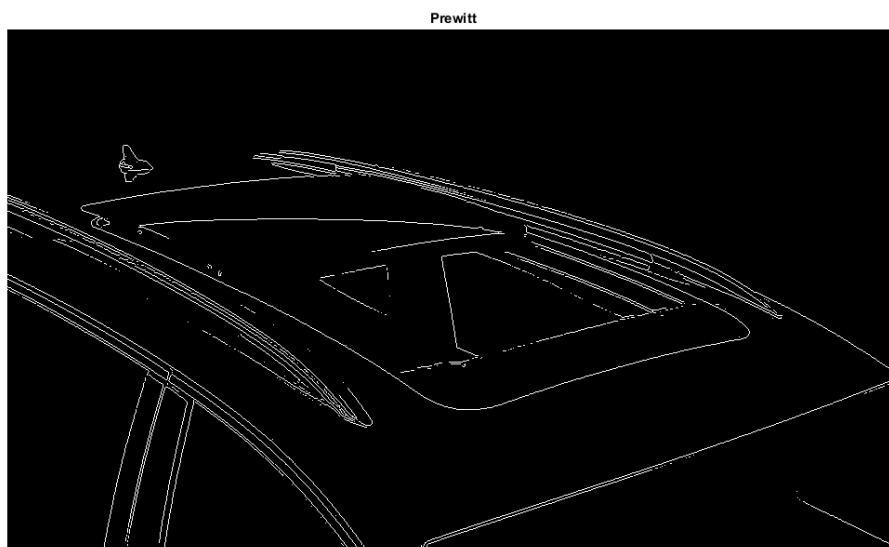


Figura 2-7: Resultado obtido pelo Operador de Prewitt

### 2.2.2.3 Operador de Roberts

Conhecido por ser o primeiro operador de gradiente utilizado em detecção de bordas, o operador de Roberts, utiliza duas matrizes de convolução para obter a magnitude e direção da variação de intensidade do claro para o escuro:

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \times A \quad G_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \times A \quad (7)$$

Como as matrizes têm dimensão 2x2, este operador é muito sensível ao ruído. Embora a magnitude se calcule através do mesmo método que no filtro de Sobel (4), a direção obtém-se através de:

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) - \frac{3\pi}{4} \quad (8)$$

Na Figura 2-8 está apresentado o resultado da Figura 2-5 após ser tratada pelo operador de Roberts.

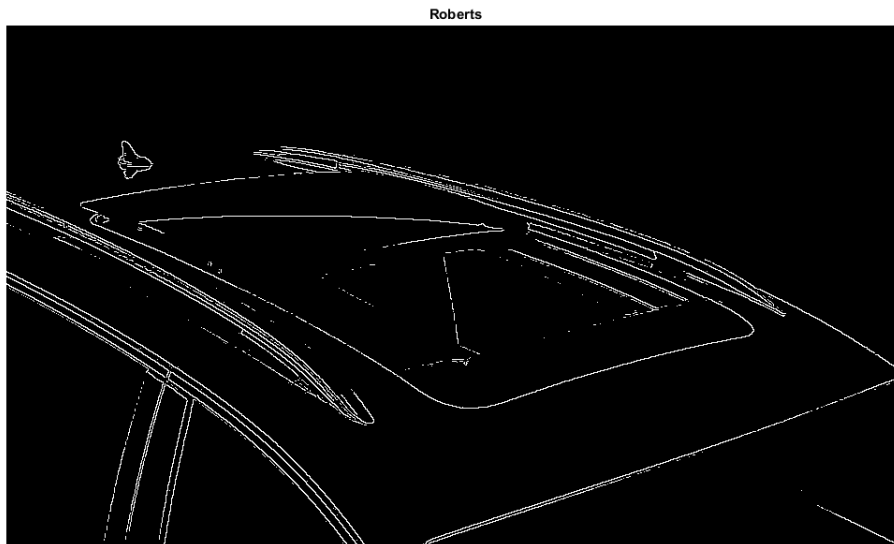


Figura 2-8: Resultado obtido pelo Operador de Roberts

#### 2.2.2.4 Operador Laplaciano

Ao contrário dos restantes, este operador não realiza a deteção de borda através da primeira derivada, mas sim, através da segunda. Esta diferença, traz vantagens visto ser capaz de destacar descontinuidades em níveis de cinzento e é muito mais sensível a pequenas variações. Porém, este aumento da sensibilidade também tem efeitos negativos, uma vez que as operações derivativas amplificam o ruído da imagem. Assim, com o objetivo de contornar este problema, são aplicadas técnicas para suavizar a imagem, tal como o filtro de Gauss<sup>2</sup>.

Este operador não indica a direção da variação de intensidade e, para um espaço bidimensional, segue a seguinte expressão:

$$L(x, y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (9)$$

Onde,  $L(x, y)$  corresponde à intensidade do pixel da imagem.

Na Figura 2-9 está apresentado o resultado da Figura 2-5 após ser tratada pelo operador Laplaciano.

---

<sup>2</sup> Filtro utilizado pelo programa MATLAB, antes de aplicar o operador Laplaciano. Daí o nome da função do programa se designar “LoG” (*Laplacian of Gaussian*).

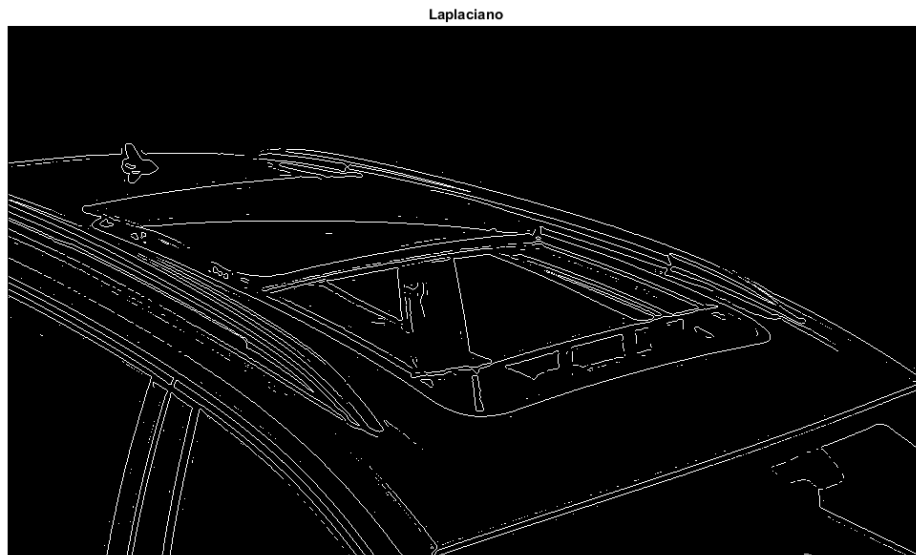


Figura 2-9: Resultado obtido pelo Operador Laplaciano

#### 2.2.2.5 Filtro de Canny

Este operador trata de ser o mais complexo e, tal como o operador Laplaciano, difere de todos os operadores já apresentados. Em primeiro lugar, parte por maximizar a relação entre o sinal e ruído do gradiente, de maneira a assegurar uma boa detecção do contorno, através de um filtro Gaussiano. De seguida, utiliza uma técnica, designada por *Non-Maxima Suppression*, que localiza a borda com a maior precisão possível, ao engrossar bordas definidas por mais de um pixel. Utiliza também, uma técnica designada por *Hysteresis thresholding*, que determina possíveis bordas e elimina bordas identificadas por lapso. Por fim, minimiza múltiplas respostas que surgiram de uma só borda, reduzindo ao máximo o ruído da imagem. É possível observar o resultado da Figura 2-5 após ser tratada pelo filtro de Canny, através da seguinte figura (Figura 2-10).

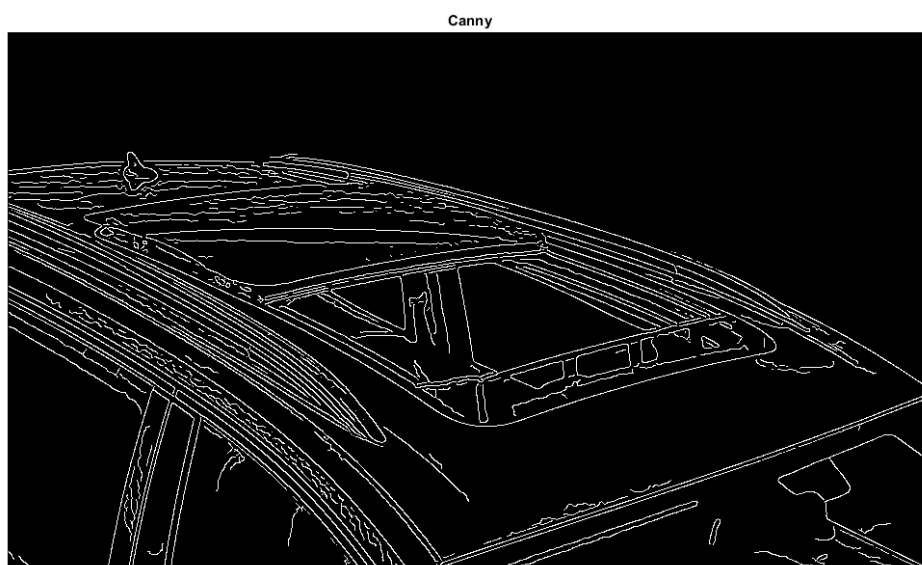


Figura 2-10: Resultado obtido pelo Filtro de Canny

#### **2.2.2.6 Análise comparativa dos operadores**

O objetivo deste subcapítulo é ordenar os operadores tendo em conta a sua eficácia e eficiência para identificar o desalinhamento entre o teto e a carroçaria do veículo. Para tal, consideram-se as características dos princípios de funcionamento de cada operador, para identificar as suas vantagens e as suas desvantagens.

Como referido anteriormente, existem operadores com princípios de funcionamento mais complexo que outros. Este aumento de complexidade não só pode vir a garantir uma deteção de borda mais rigorosa e detalhada, mas também aumenta a dificuldade da sua implementação, tal como o tempo de computação.

Conhecido por ser o primeiro operador utilizado, o operador de Roberts apenas usa duas máscaras de dimensões  $2 \times 2$ , sendo então o operador mais simples de implementar. A sua simplicidade traz desvantagens visto ser bastante sensível ao ruído.

Aumentando a máscara para dimensões de  $3 \times 3$ , obtém-se o operador de Prewitt. Embora minimamente mais complexo do que o operador de Roberts, não deixa de ser mais afetado pelo ruído do que o filtro de Sobel.

Considerando agora os operadores que utilizam derivadas de segunda ordem, entra o operador Laplaciano, que é mais sensível a pequenas variações e utiliza um filtro de Gauss para não ser afetado pelo ruído.

Finalmente, o mais complexo dos operadores apresentados é o filtro de Canny, que utiliza diferentes técnicas para garantir uma deteção de borda muito rigorosa e eficaz.

Todos estes operadores foram experimentados no programa MATLAB, e todos tiveram resultados expectáveis. Embora o tempo de computação aumente com a complexidade do operador, a diferença de tempo de processamento do filtro de Canny para o operador de Roberts é desprezável. Para obter um resultado rigoroso na deteção de borda, considera-se o filtro de Canny, como o operador para tratamento da imagem captada, para medição do desalinhamento entre o teto panorâmico e a carroçaria do veículo.

## Medição do desalinhamento

Neste capítulo é descrito o funcionamento atual da estação de trabalho, tal como é realizada a medição do desalinhamento. De seguida, estudam-se os parâmetros de projeto e escolhe-se o método que será utilizado, tendo em conta a sua aplicação e de maneira a garantir que todos os requisitos funcionais sejam cumpridos.

### 3.1 Solução atual

Como o objetivo deste projeto é a criação de um autómato para reduzir o tempo de montagem do teto panorâmico, é fundamental conhecer a solução atual. Esta estação de trabalho dá resposta a 14 carros por hora e são realizadas as seguintes operações:

- Instalação da tubagem de drenagem de água do teto panorâmico;
- Medição do alinhamento entre o teto panorâmico e a carroçaria;
- Ajuste e correção do possível desalinhamento;
- Teste de funcionamento do sistema elétrico do teto panorâmico.

Dos quatro processos acima descritos, a medição do alinhamento é a operação mais demorada. Para conhecer a razão da sua demora, é necessário conhecer o teto panorâmico e como está a decorrer o processo de medição.



Figura 3-1: Teto panorâmico

Tal como se pode verificar através da Figura 3-1, o teto panorâmico é composto por duas partes: um vidro traseiro e um vidro frontal. Ambos, contêm dois furos rasgados e são fixos à estrutura do teto, através do atrito criado pelo aperto de parafusos. Para realizar o alinhamento do teto panorâmico, é necessário desapertar os parafusos, realizar os ajustes (na vertical) e apertar novamente os parafusos de fixação.

Pelo fato de haver quatro parafusos de ajuste por vidro, o desalinhamento do teto panorâmico está dependente de oito variáveis. Através das mesmas, não só é possível descobrir o posicionamento do teto, como qual o ajuste que cada deverá ser aplicado de maneira a garantir um alinhamento com a carroçaria. Porém, atualmente, as medições não são realizadas nesses quatro pontos, mas sim nos seis pontos representados na seguinte figura (Figura 3-2):

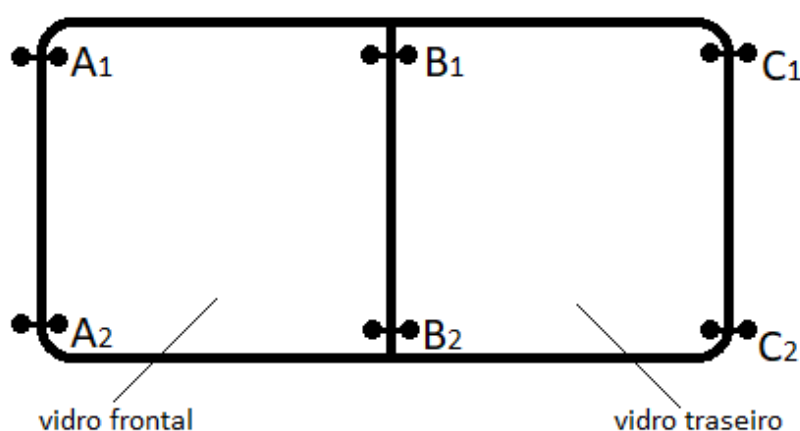


Figura 3-2: Pontos de medição do desalinhamento atual

Tanto o tejadilho como o próprio teto panorâmico não são planos. Ambos, têm curvaturas de grande raio, ao longo do comprimento e da largura do carro. Assim, para que seja possível realizar o alinhamento respeitando a aerodinâmica dos veículos, os vidros do teto terão de ser ajustados de maneira a que o conjunto, vidros mais carroçaria, seja representado por uma função matemática, contínua e diferenciável. Na realidade cada um dos pontos assinalados na figura corresponde a um pequeno intervalo de distância que inclui a carroçaria e o teto, para o caso de  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $C_1$  e  $C_2$ , e os dois vidros, no caso de  $B_1$  e  $B_2$ . Assim, para manter a aerodinâmica do veículo as cotas nominais entre a carroçaria e o teto ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $C_1$  e  $C_2$ ) e entre os dois vidros do teto ( $B_1$  e  $B_2$ ) têm valores não nulos.

Atualmente, são realizadas, individualmente e uma de cada vez, medições nos seis pontos assinalados para assegurar que todos se encontram dentro de um intervalo de tolerância que não afeta a aerodinâmica do veículo. Cada ponto tem, então, uma cota nominal e respetivos desvios inferior e superior que definem o intervalo de tolerância. A Tabela 3-1 representa os valores já utilizados no alinhamento do teto panorâmico.



Tabela 3-1: Cotas nominais e tolerâncias dos pontos para alinhamento do teto

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Cota Máxima</b>	+1	+1,3	+1,8
<b>Cota Nominal</b>	+0,7	+0,5	+0,8
<b>Cota Mínima</b>	0	0	-0,2

## 3.2 Parâmetros de projeto

A realização deste projeto tem como objetivo aumentar a cadência da estação de trabalho encarregue do alinhamento do teto panorâmico. Assim, é necessário conhecer tanto os parâmetros de projeto e devidas restrições, de maneira a que seja possível satisfazer os requisitos funcionais. Para acelerar o processo de medição do desalinhamento, é desenvolvido um sistema capaz de realizar as medições de todos os pontos assinalados na Figura 3-1 simultaneamente.

Visto que a superfície da carroçaria dos veículos corresponde à referência na medição do alinhamento, o sistema, que realiza a medição do desalinhamento, tem de estar apto para identificar o posicionamento da mesma. Este problema é solucionado com a adição de sensores ao suporte, que definem a referência do sistema de coordenadas relativas à carroçaria.

Tendo em conta que o sistema medirá o desalinhamento de inúmeros veículos, é muito difícil garantir um alinhamento perfeito entre o autómato e as carroçarias de todas as viaturas. Por outras palavras, é quase impossível assegurar a mesma posição do suporte com os sensores relativamente à carroçaria de cada veículo. Esta falta de precisão no alinhamento do suporte com a carroçaria traz problemas para a medição, pelo o fato dos tejadilhos dos veículos não serem planos. Para solucionar este problema, tira-se partido da semelhança existente entre os tejadilhos do mesmo modelo e, com o auxílio de múltiplos sensores, descobre-se qual o posicionamento do suporte relativamente à carroçaria. De seguida, através de uma medição indireta descobre-se qual o desalinhamento do teto panorâmico.

Este projeto foi desenvolvido de maneira a garantir que todas as variáveis fossem independentes umas das outras e reduzir ao máximo o custo de produção. Resta, agora, analisar as duas técnicas de medição, por instrumentos de medição e por processamento de imagem, as suas implementações, suporte fixo ou móvel, e optar pelo mais adequado para esta estação de trabalho.

A medição do alinhamento entre os vidros e a carroçaria faz-se a todos os veículos, para certificar se há necessidade de realizar o ajuste. Por isso, nem todas as operações desta estação de trabalho, referidas anteriormente no subcapítulo 3.1, são obrigatórias. O seguinte fluxograma, apresentado na figura 3-3, descreve todo o processo.

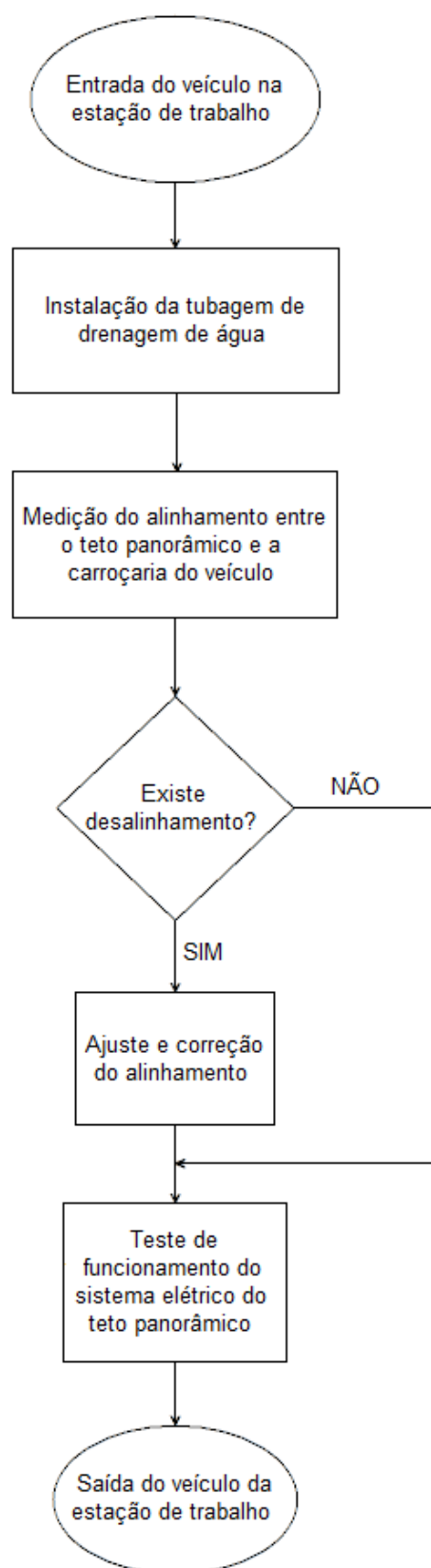


Figura 3-3: Fluxograma das operações da estação de trabalho

### 3.3 Medição por instrumentos de medição

A fim de realizar a medição com comparadores, é necessário desenvolver um suporte móvel capaz de deslocar os sensores até aos pontos pretendidos (Figura 3-2). Com o objetivo de reduzir os custos e para desacoplar o projeto, utiliza-se o número mínimo de comparadores possíveis para identificar o posicionamento da carroçaria e do teto panorâmico. Baseando na solução atual, realiza-se medições nos pontos assinalados na Figura 3-2. Por cada ponto serão realizadas duas medições, logo são necessários no total doze comparadores.

Uma vez que os comparadores lineares convertem uma variação de posição unidirecional e serão instalados na vertical, é necessário que o suporte também se desloque na vertical. Como referido anteriormente, existe o objetivo de reduzir os custos de projeto, logo o suporte apenas se moverá unidireccionalmente, neste caso, verticalmente, paralelo aos comparadores.

Porém, o fato do suporte de comparadores apenas se movimentar numa direção, cria um problema visto que a carroçaria do veículo, após entrar na estação de trabalho, dificilmente ficará devidamente alinhada com o suporte de comparadores. Provocando, então, a realização da medição desviada dos pontos pretendidos. Para tal, é necessário o desenvolvimento de um programa capaz calcular o valor do ajuste necessário para o alinhamento do teto panorâmico, tendo em conta esse desvio.

Para descobrir o desalinhamento da posição da carroçaria relativamente ao suporte de comparadores, optou-se pela utilização de sensores de medição por radiação. Uma vez que a carroçaria terá de entrar em movimento para entrar e sair da estação de trabalho, torna-se difícil utilizar sensores que realizam a medição por contacto, para medir distâncias ao longo da largura e do comprimento do veículo. A medição por radiação é mais precisa do que a medição ultrassónica e pode ser realizada em qualquer ponto da carroçaria. Como é necessário conhecer o valor do desalinhamento da carroçaria relativamente ao suporte, ao longo da largura e do comprimento do veículo, são necessários dois sensores. Um deles, situar-se-á numa das laterais do veículo, para medir o valor do desvio transversal. O feixe de luz do sensor terá de ficar perpendicular ao comprimento e paralelo à largura do automóvel para garantir que o desvio equivale ao valor medido. O outro sensor, encontrar-se-á, ou na dianteira, ou na traseira do veículo, porém o seu feixe de luz não poderá ser paralelo ao comprimento do veículo, para evitar que o mesmo sensor se situe no caminho do automóvel quando este entrar e sair da estação de trabalho. Isto é, o valor do desvio não é equivalente ao valor medido, mas sim ao valor da sua componente paralela ao comprimento do veículo. O valor da componente resulta da multiplicação do valor medido pela inclinação existente entre o feixe de luz do sensor e o eixo paralelo ao comprimento do carro.

Para deslocar verticalmente o suporte de comparadores é utilizado um sistema ligado a um controlador operado pelos operários presentes na estação de trabalho. A escolha do mesmo sistema é efetuada posteriormente no subcapítulo 5.1.

### 3.4 Aplicação do processamento de imagem

Neste subcapítulo, descreve-se ao pormenor como é realizada a medição por processamento de imagem.

Para que seja possível realizar a medição por processamento de imagem, não só se tem em consideração o próprio tratamento e processamento computacional, mas também como a imagem é captada. A captação da imagem é uma etapa muito importante neste método, visto que existem fatores como a distância da câmara ao teto panorâmico, tal como a própria resolução da imagem captada, que definem a escala da medição. A resolução da imagem captada define o número de pixéis existentes na imagem e, por sua vez, o tamanho da matriz imagem. Quanto maior for a matriz, maior é a informação captada e cada pixel corresponderá a um menor valor de comprimento real, obtendo-se uma divisão da escala inferior. Por outro lado, quanto mais próxima estiver a câmara do teto, maior é o detalhe do intervalo que se pretende medir. Conclui-se assim, que se tem de arranjar uma relação entre a resolução das imagens captadas e a distância da câmara ao teto panorâmico, para que seja possível relacionar o número de pixéis com uma distância real.

Após o tratamento de imagem, realiza-se a contagem de pixéis recorrendo a um programa também este, desenvolvido em MATLAB, visto que as superfícies representadas na matriz se encontram separadas por contornos. Como foi referido e já demonstrado, após a deteção de borda os contornos das superfícies passam a ter o valor de 1 e o resto passa a ser nulo.

Visto que o veículo dificilmente ficará devidamente alinhado com o suporte de comparadores na estação de trabalho, é necessário utilizar uma câmara adicional para medição do desvio. Enquanto na medição por instrumentos de medição são necessários dois sensores para medir tanto o desvio transversal, como o desvio longitudinal, neste caso, apenas uma câmara, instalada em cima do veículo, é capaz de medir ambos os desvios através de uma captação de imagem. Ao apenas captar um canto do carro, é possível concluir o valor dos desvios pretendidos, com uma simples contagem de pixéis.

Para facilitar o tratamento e o processamento das imagens captadas, poderá vir a ser necessário realçar tanto os limites da carroçaria do veículo, tal como as suas curvaturas. Para tal, poderão ser utilizados painéis com uma cor que se destaque relativamente à cor da pintura do veículo de maneira a esconder objetos no cenário captado que poderão ter cores semelhantes à mesma pintura. Outro problema surge quando a pintura do veículo é escura. Isto porque, a cor do vidro do teto panorâmico é também esta escura, o que pode dificultar a identificação dos contornos. Para tal, são utilizados autocolantes com uma cor que se destaque para facilitar o processamento.

### **3.5 Comparação entre a medição por comparadores e por processamento de imagem**

O objetivo deste subcapítulo é analisar qual a técnica de medição mais adequada para o projeto. Sendo o objetivo reduzir custos e desacoplar o máximo possível o mesmo.

Como no processamento de imagem o suporte é imóvel, evita-se o custo inicial na aquisição de um sistema que desloque verticalmente o suporte. Por outro lado, apenas é necessária uma câmara para descobrir os valores de desalinhamento entre o veículo e o suporte, enquanto na medição por comparadores, são necessários dois sensores de medição por radiação.

Porém, a medição por comparadores garante medições diretas, reduzindo então o valor de erros das mesmas, tal como torna o sistema mais preciso. Por outro lado, simplifica muito o projeto, visto não ser necessário o tratamento e processamento de dados para passar de uma captação de imagem para valores de distância. Vários parâmetros seriam necessários ter em conta para concluir os valores de distância aos pontos pretendidos, o que torna o projeto mais acoplado. A adição de painéis na estação de trabalho e autocolantes em pontos chave no veículo, para facilitar o tratamento e processamento de imagem também aumentam os custos, a curto e longo prazo, e diminuem a cadência da estação de trabalho.

Através da medição por processamento de imagem, existem muitos parâmetros de projeto dependentes entre si. A luminosidade da estação de trabalho, o contraste das cores da pintura do carro, a distância das câmaras ao ponto de captura, a própria resolução das câmaras, os objetos presentes no cenário, são todos parâmetros que poderão vir a afetar a medição indireta. A probabilidade de ocorrerem erros durante a medição é muito grande.

Assim, pelas razões mencionadas anteriormente, justifica-se o custo inicial do sistema para deslocar verticalmente o suporte de comparadores e, seguindo a metodologia do primeiro axioma da teoria axiomática de projeto, optou-se por se utilizar comparadores para realizar a medição do desalinhamento entre o teto panorâmico e o tejadilho do veículo.



## Processamento dos valores medidos

Após a realização da medição, é necessário processar os valores obtidos, para indicar qual deverá ser o ajuste a realizar em cada um dos pontos do teto. Este capítulo está repartido em duas etapas: a primeira, corresponde à obtenção de funções analíticas que indicam o valor de ajuste a realizar, através dos valores medidos. A segunda fase descreve o desenvolvimento de um programa em linguagem MATLAB, capaz de receber os valores obtidos na medição e, através das funções analíticas, devolver os valores de ajuste a realizar em cada ponto.

### 4.1 Determinação das funções analíticas de alinhamento

Devido à complexidade que existe em consequência da curvatura do teto panorâmico e do tejadilho, é necessário realizar simplificações. Procede-se, então, com o desenvolvimento de funções considerando que, tanto o teto, como o tejadilho são planos. Esta alteração simplifica muito o problema inicial e ajuda a encontrar as relações geométricas entre os valores medidos e de ajuste final. Considera-se que o teto panorâmico é apenas constituído por um único vidro, em vez de dois. Isto significa que em vez de seis pontos de medição (Figura 3-2), apenas se trabalha com quatro pontos. Assim, numa fase inicial, facilita-se a determinação das funções.

Antes de começar com o desenvolvimento das funções é necessário definir uma nomenclatura e simbologia de pontos, cumprimentos e ângulos a considerar. A seguinte figura (Figura 4-1) ajuda a entender o posicionamento de certos elementos presentes na tabela de simbologia (Tabela 4-1). Na figura (Figura 4-1) está apresentado um modelo tridimensional das superfícies superiores do teto e do tejadilho e indicados tanto os pontos de medição ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$  e  $D_2$ ), tal como os pontos de ajuste ( $E$ ,  $F$ ,  $G$  e  $H$ ).

O sistema automatizado realiza as medições das superfícies do teto e do tejadilho na vertical, de cima para baixo, e regista todos os valores medidos de acordo com a nomenclatura de cada ponto de medição ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$  e  $D_2$ ).

Na Figura 4-1 também está representado o referencial definido.

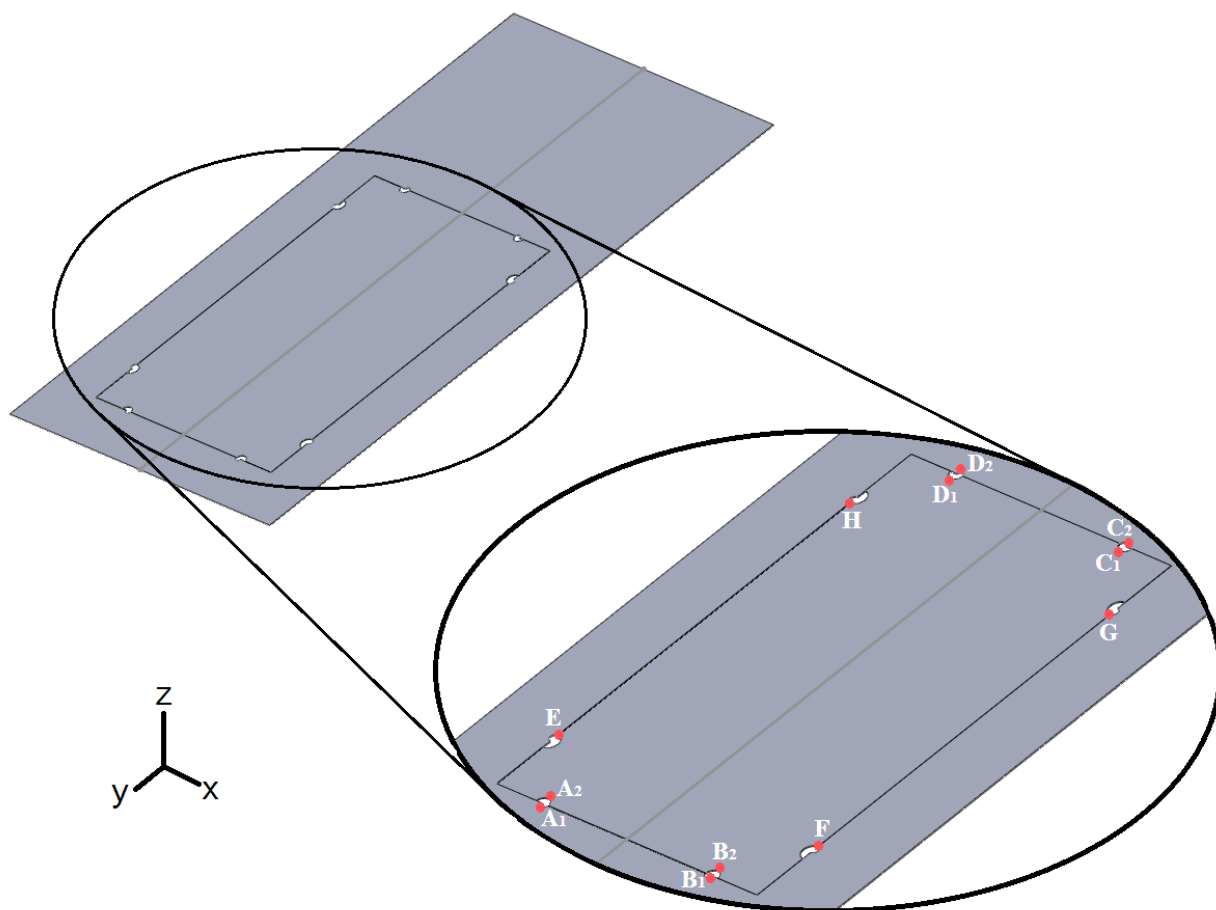


Figura 4-1: Identificação dos pontos de medição e de ajuste com teto e tejadilho planos

#### 4.1.1 Simbologia

Conhecidos os pontos de medição e de ajuste, são apresentadas na seguinte tabela (Tabela 4-1) todos os símbolos e devidas descrições dos elementos necessários para a determinação das funções analíticas.

Tabela 4-1: Simbologia

Simbologia	Descrição	Valor (mm)
<b>a</b>	Desalinhamento do teto relativamente ao tejadilho no ponto A	–
<b>b</b>	Desalinhamento do teto relativamente ao tejadilho no ponto B	–
<b>c</b>	Desalinhamento do teto relativamente ao tejadilho no ponto C	–
<b>d</b>	Desalinhamento do teto relativamente ao tejadilho no ponto D	–
<b>e</b>	Desalinhamento do teto relativamente ao tejadilho no ponto E	–



<b>f</b>	Desalinhamento do teto relativamente ao tejadilho no ponto F	–
<b>g</b>	Desalinhamento do teto relativamente ao tejadilho no ponto G	–
<b>h</b>	Desalinhamento do teto relativamente ao tejadilho no ponto H	–
<b><math>\alpha</math></b>	Ângulo de inclinação do teto em torno do eixo dos yy	–
<b><math>\beta</math></b>	Ângulo de inclinação do teto em torno do eixo dos xx	–
<b><math>\theta</math></b>	Ângulo de inclinação da carroçaria em torno do eixo dos yy	–
<b><math>\gamma</math></b>	Ângulo de inclinação da carroçaria em torno do eixo dos xx	–
<b>X</b>	Distância entre os pontos de ajuste no eixo dos xx	860
<b>Y</b>	Distância entre os pontos de ajuste no eixo dos yy	950
<b>X<sub>a</sub></b>	Distância entre os comparadores do autómato no eixo dos xx	560
<b>Y<sub>a</sub></b>	Distância entre os comparadores do autómato no eixo dos yy	1310
<b><math>\Delta x</math></b>	Desvio entre o veículo e o autómato no eixo dos xx	–
<b><math>\Delta y</math></b>	Desvio entre o veículo e o autómato no eixo dos yy	–

Os pontos onde se vão situar os sensores, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub>, não correspondem às extremidades do teto e do tejadilho. Desta forma, cria-se uma margem de 40 mm, para compensar o desalinhamento da carroçaria relativamente ao suporte de comparadores.

#### 4.1.2 Equações de alinhamento do teto, com o mesmo e o tejadilho planos

Seguindo a metodologia de partir do mais simples para o problema real e mais complexo, tal como foi referida no início do capítulo, considera-se, numa etapa inicial, que o teto apenas tem inclinação em torno do eixo dos yy relativamente ao tejadilho ( $\alpha - \theta \in \mathbb{R}$  e  $\beta - \gamma = 0$ ).

Considera-se também que o desvio entre o teto e o autómato é nulo ( $\Delta x = 0$ ). Isto é, o veículo encontra-se devidamente posicionado e idealmente alinhado com o autómato.

Recorrendo aos valores medidos, conclui-se tanto a inclinação da carroçaria, tal como a do teto. Para tal, é agora definida a simbologia das inclinações do teto panorâmico e do tejadilho, em torno dos eixos xx e yy. É ainda indicado, por relações trigonométricas, como são obtidos os valores das mesmas inclinações.

#### $\theta$ - Inclinação da carroçaria em torno do eixo dos yy

Tendo em conta os valores medidos  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  e  $D_1$ , que são diretamente retirados a partir da carroçaria, é possível concluir o valor de  $\theta$ , visto que se conhece o valor da distância entre os sensores comparadores em xx ( $X_a$ ). Através de uma relação trigonométrica conclui-se que:

$$\tan(\theta) = \frac{B_1 - A_1}{X_a} = \frac{D_1 - C_1}{X_a} \quad (10)$$

#### $\gamma$ - Inclinação da carroçaria em torno do eixo dos xx

Tal como realizado para descobrir o valor de  $\theta$ , utilizam-se os valores medidos  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  e  $D_1$ , que são diretamente retirados a partir da carroçaria, para descobrir o valor de  $\gamma$ , porque se conhece o valor da distância entre os sensores em yy ( $Y_a$ ). Através de uma relação trigonométrica conclui-se que:

$$\tan(\gamma) = \frac{D_1 - A_1}{Y_a} = \frac{C_1 - B_1}{Y_a} \quad (11)$$

#### $\alpha$ - Inclinação do teto em torno do eixo dos yy

A inclinação do teto em torno do eixo dos yy, obtém-se pelo mesmo método utilizado para descobrir o valor de  $\theta$ , porém recorre-se aos valores diretamente medidos do teto,  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$  e  $D_2$ .

$$\tan(\alpha) = \frac{B_2 - A_2}{X_a} = \frac{D_2 - C_2}{X_a} \quad (12)$$

#### $\beta$ - Inclinação do teto em torno do eixo dos xx

Finalmente, a inclinação do teto em torno do eixo dos yy, obtém-se através dos valores diretamente medidos do teto,  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$  e  $D_2$ .

$$\tan(\beta) = \frac{D_2 - A_2}{Y_a} = \frac{C_2 - B_2}{Y_a} \quad (13)$$

Na figura seguinte (Figura 4-2) está representado a inclinação da carroçaria em torno do eixo dos yy ( $\theta$ ) e a inclinação do teto em torno do eixo dos yy ( $\alpha$ ).

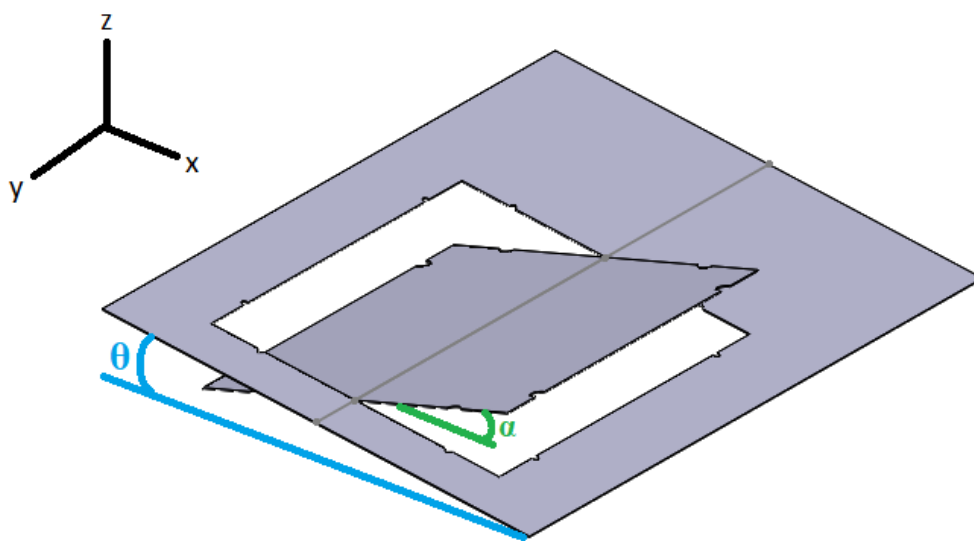


Figura 4-2: Inclinações do tejadilho e do teto em torno do eixo dos yy

Na figura seguinte (Figura4-3) está representado a inclinação da carroçaria em torno do eixo dos xx ( $\gamma$ ) e a inclinação do teto em torno do eixo dos xx ( $\beta$ ).

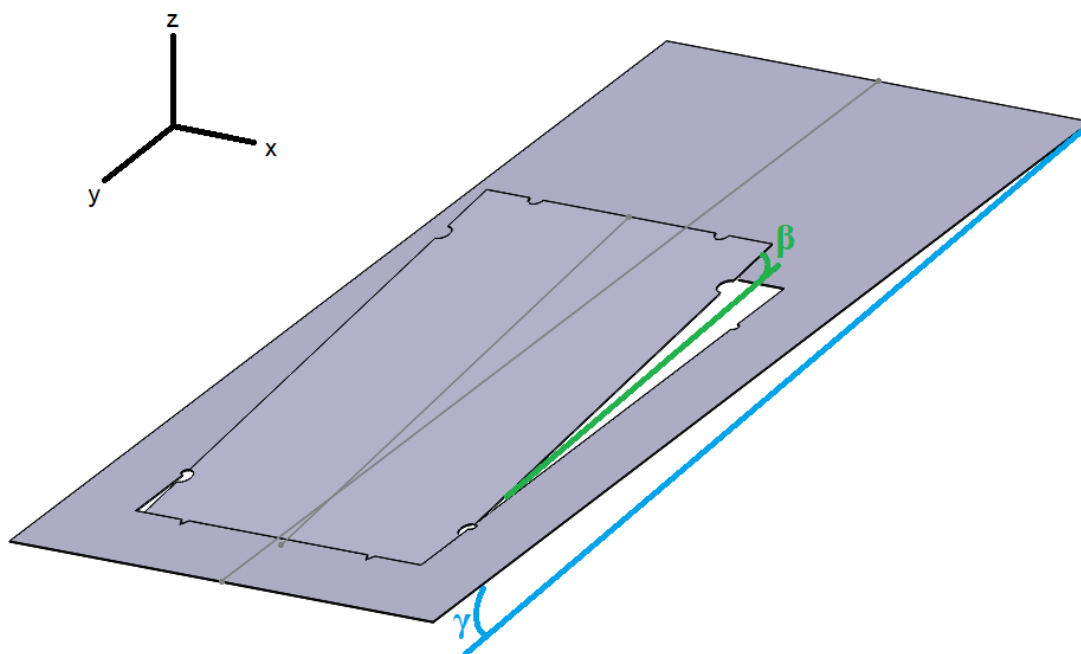


Figura 4-3: Inclinações do tejadilho e do teto em torno do eixo dos xx

Uma vez que a inclinação da carroçaria não pode ser alterada durante o processo de alinhamento, admite-se um novo referencial relativo à superfície da mesma. Considerando então o plano  $X'O'Y'$  pertencente e tangente à superfície superior do tejadilho do veículo e  $Z'$  normal ao plano, com sentido de baixo para cima.

Agora que se conhecem os valores das inclinações do tejadilho e do teto, é possível relacionar os valores de ajuste relativamente aos medidos. Através da figura posterior (Figura 4-4), é possível concluir que o desalinhamento no ponto E e no ponto F são diretamente proporcionais aos dos pontos A e B, respetivamente. Apenas tem de se encontrar uma relação entre os mesmos e as distâncias  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_1'$  e  $X_2'$ .

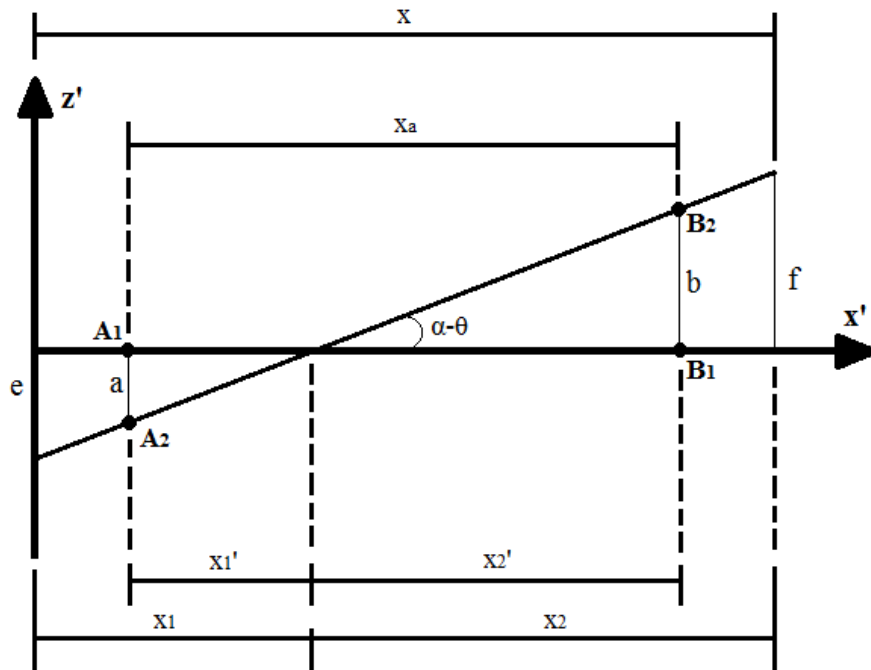


Figura 4-4: Inclinação do teto relativamente ao tejadilho (Pano  $X'O'Z'$ )

Antes de começar a relacionar as distâncias é necessário conhecer o valor do ângulo  $\alpha - \theta$ . Recorrendo às expressões anteriormente desenvolvidas (10 e 12), retira-se:

$$\alpha - \theta = \tan^{-1} \left( \frac{B_2 - A_2}{X_a} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{B_1 - A_1}{X_a} \right) \quad (14)$$

Conhecendo o valor de  $\alpha - \theta$ , descobrem-se os valores de  $x_1'$  e  $x_2'$ , partindo pelos valores de  $a$  e  $b$  e através de uma relação trigonométrica:

$$\tan(\alpha - \theta) = \frac{-a}{X_1'} = \frac{b}{X_2'} \Rightarrow \begin{cases} a = -X_1' \times \tan(\alpha - \theta) \\ b = X_2' \times \tan(\alpha - \theta) \end{cases} \text{ ou } \begin{cases} X_1' = -\frac{a}{\tan(\alpha - \theta)} \\ X_2' = \frac{b}{\tan(\alpha - \theta)} \end{cases} \quad (15)$$

Tendo em conta que a variável  $\underline{X}$  corresponde à distância entre os pontos de ajuste no eixo dos  $xx$  e que o veículo está perfeitamente alinhado com o autómato ( $\Delta x=0$ ), relaciona-se  $X_1$  e  $X_1'$ , uma vez que  $X$  e  $X_a$  estão alinhados.

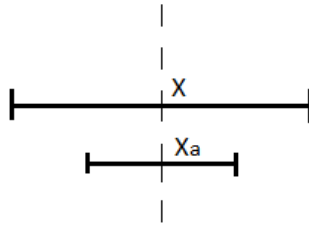


Figura 4-5:  $\Delta x=0$

Assim, de acordo com a Figura 4-5,  $x_1$  é equivalente a:

$$X_1 = X_1' + \frac{X - X_a}{2} \quad (16)$$

Realizando agora uma proporcionalidade direta entre os valores de  $a$ ,  $X_1$  e  $X_1'$ , conclui-se o valor de  $e$ :

$$\frac{e}{X_1} = \frac{a}{X_1'} \Leftrightarrow e = \frac{a \times X_1}{X_1'} \quad (17)$$

Substituindo na equação 17, o valor de  $X_1$  concluído na equação 16, resulta:

$$e = \frac{a \times \left( X_1' + \frac{X - X_a}{2} \right)}{X_1'} \Leftrightarrow e = a + \frac{a \times \left( \frac{X - X_a}{2} \right)}{X_1'} \quad (18)$$

Pela relação trigonométrica obtida na equação 15, substitui-se  $X_1'$ :

$$e = a + \frac{a \times \left( \frac{X - X_a}{2} \right)}{-\frac{a}{\tan(\alpha - \theta)}} \Leftrightarrow e = a - \frac{1}{2}(X - X_a) \times \tan(\alpha - \theta) \quad (19)$$

Seguindo pelo mesmo método utilizado para o ponto E, conclui-se o desalinhamento no ponto F ( $f$ ), resultando:

$$f = b + \frac{1}{2}(X - X_a) \times \tan(\alpha - \theta) \quad (20)$$

Obteve-se as equações 19 e 20, ao considerar que o veículo estava devidamente alinhado com o sistema. Porém, existirão maioritariamente desvios do veículo, que afetam o valor de ajuste a realizar. Uma vez que se está a trabalhar no plano  $X'O'Z'$ , admite-se, agora, um desvio no eixo dos  $xx$  ( $\Delta x \in \mathbb{R}$ ) que afeta o valor de  $X_1$  e  $X_2$ .

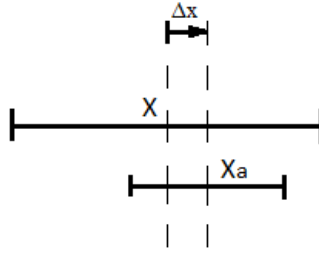


Figura 4-6:  $\Delta x \in \mathbb{R}$

Assim, de acordo com a Figura 4-6, resulta um  $X_1$  equivalente a:

$$X_1 = X_1' + \frac{X - X_a}{2} + \Delta x \quad (21)$$

Seguindo a mesma metodologia utilizada anteriormente, obtém-se os seguintes desvios para os pontos E e F:

$$\begin{aligned} e &= a - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) \\ f &= b + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) \end{aligned} \quad (22 \text{ e } 23)$$

Uma vez que se admitiu o teto e tejadilho planos, o resultado relativo ao plano  $X'O'Z'$  da aresta AB, é equivalente ao da aresta CD. Por outras palavras, conclui-se que o resultado do desalinhamento nos pontos G e H são iguais aos pontos F e E, respetivamente. O que resulta:

$$\begin{aligned} g &= c + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) \\ h &= d - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) \end{aligned} \quad (24 \text{ e } 25)$$

Conhecidas as equações de alinhamento, quando apenas existe rotação dos planos em torno de  $yy$  ( $\alpha - \theta \in \mathbb{R}$  e  $\beta - \gamma = 0$ ), determina-se, agora, quando os planos apenas têm rotação em torno do eixo dos  $xx$  ( $\alpha - \theta = 0$  e  $\beta - \gamma \in \mathbb{R}$ ). Existem algumas diferenças nos resultados, visto que a distância entre os sensores no eixo dos  $yy$  ( $Y_a$ ) é, desta vez, superior à distância entre os pontos de ajuste ( $Y$ ), como é possível verificar através da próxima figura (Figura 4-7). Como realizado anteriormente, é considerado, numa fase inicial, que existe alinhamento perfeito entre o veículo e o sistema ( $\Delta y = 0$ ).

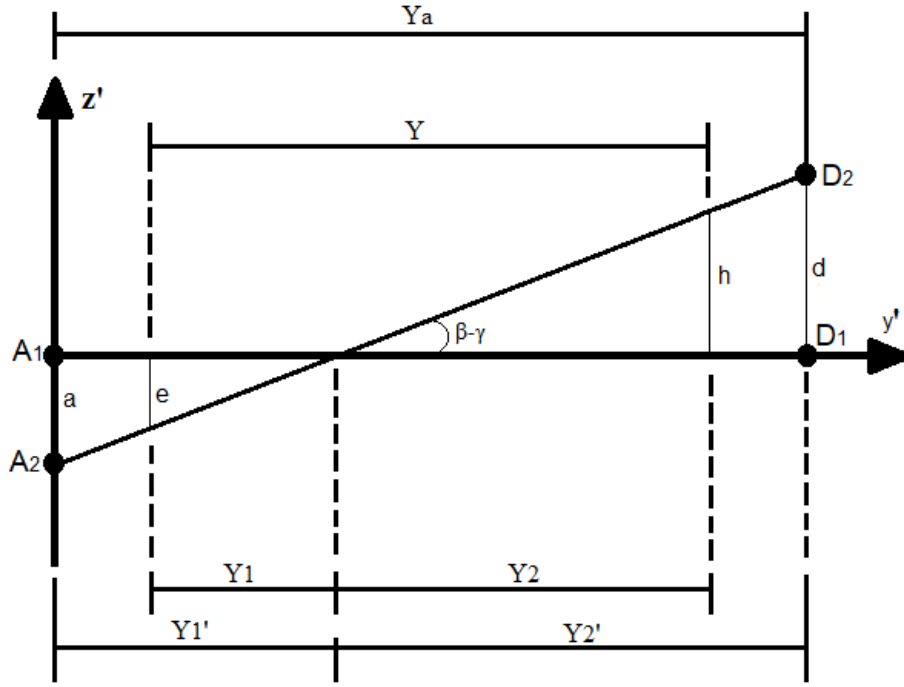


Figura 4-7: Inclinação do teto relativamente ao tejadilho (Pano Y'O'Z')

Pela mesma metodologia seguida, é necessário conhecer o valor do ângulo  $\beta - \gamma$ . Recorrendo às expressões anteriormente concluídas (11 e 13), retira-se:

$$\beta - \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{D_2 - A_2}{Y_a}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{D_1 - A_1}{Y_a}\right) \quad (26)$$

Descobre-se agora os valores de  $Y_1'$  e  $Y_2'$ , uma vez que se conhecem os valores de  $\underline{e}$  e  $\underline{h}$  e de  $\beta - \gamma$ , através de:

$$\tan(\beta - \gamma) = \frac{-a}{Y_1'} = \frac{d}{Y_2'} \Rightarrow \begin{cases} a = -Y_1' \times \tan(\beta - \gamma) \\ d = Y_2' \times \tan(\beta - \gamma) \end{cases} \text{ ou } \begin{cases} Y_1' = -\frac{a}{\tan(\beta - \gamma)} \\ Y_2' = \frac{d}{\tan(\beta - \gamma)} \end{cases} \quad (27)$$

Como o desvio da carroçaria relativamente ao automático é nulo ( $\Delta y = 0$ ), relaciona-se então  $Y_1$  e  $Y_1'$ .

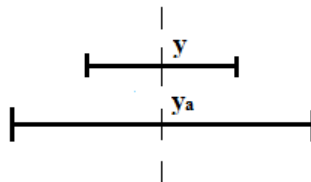


Figura 4-8:  $\Delta y = 0$

Assim, de acordo com a Figura 4-8,  $Y_1$  é equivalente a:

$$Y_1 = Y_1' - \frac{Y_a - Y}{2} \quad (28)$$

Por proporcionalidade direta conclui-se o valor de  $e$ :

$$\frac{e}{Y_1} = \frac{a}{Y_1'} \Leftrightarrow e = \frac{a \times Y_1}{Y_1'} \quad (29)$$

Tendo em conta a equação 28:

$$e = \frac{a \times \left(Y_1' - \frac{Y_a - Y}{2}\right)}{Y_1'} \Leftrightarrow e = a + \frac{a \times \left(-\frac{Y_a - Y}{2}\right)}{Y_1'} \quad (30)$$

Substitui-se agora  $Y_1'$ :

$$e = a + \frac{a \times \left(-\frac{Y_a - Y}{2}\right)}{-\frac{a}{\tan(\beta - \gamma)}} \Leftrightarrow e = a + \frac{1}{2}(Y_a - Y) \times \tan(\beta - \gamma) \quad (31)$$

O desalinhamento no ponto H ( $h$ ), é equivalente a:

$$h = d - \frac{1}{2}(Y_a - Y) \times \tan(\beta - \gamma) \quad (32)$$

Tal como foi realizado anteriormente, considera-se, agora, um desvio no posicionamento do veículo relativamente ao sistema. Como se está a trabalhar no plano  $Y'O'Z'$ , admite-se, desta vez, um desvio no eixo dos  $yy$  ( $\Delta y \in \mathbb{R}$ ) que afeta o valor de  $Y_1$  e  $Y_2$ .

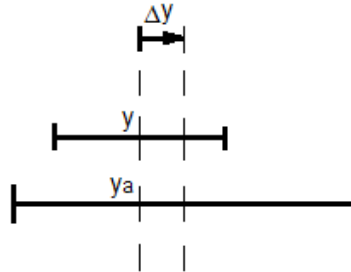


Figura 4-9:  $\Delta y \in \mathbb{R}$

Assim de acordo com a Figura 4-9, resulta um  $Y_1$  equivalente a:

$$Y_1 = Y_1' - \frac{Y_a - Y}{2} + \Delta y \quad (33)$$

Seguindo a mesma metodologia, obtêm-se as seguintes equações para os pontos E e F:

$$\begin{aligned} e &= a + \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma) \\ h &= d - \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma) \end{aligned} \quad (34 \text{ e } 35)$$



Agora que descobertas as equações de alinhamento relativas aos pontos da aresta AD, concluem-se as equações da aresta BC. Sabe-se que o resultado do desalinhamento nos pontos F e G são iguais aos pontos E e H, respetivamente:

$$\begin{aligned} f &= b + \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma) \\ g &= c - \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma) \end{aligned} \quad (36 \text{ e } 37)$$

Conhecidas todas as equações de alinhamento em cada ponto de ajuste (E, F, G e H), para ambas as inclinações em torno do eixo dos xx e dos yy, obtêm-se as equações finais de alinhamento, quando existe qualquer tipo de inclinação do teto panorâmico e do tejadilho do veículo ( $\alpha - \theta \in \mathbb{R}$  e  $\beta - \gamma \in \mathbb{R}$ ). Equações estas que indicam qual o ajuste a realizar, mesmo com posicionamento imperfeito do veículo relativamente ao autómato no eixo dos xx e dos yy ( $\Delta x \in \mathbb{R}$  e  $\Delta y \in \mathbb{R}$ ).

- $e = a - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) + \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma)$
- $f = b + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) + \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma)$
- $g = c + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) - \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma)$
- $h = d - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) - \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma)$

Onde: (38 a 41)

- $\alpha - \theta = \tan^{-1} \left( \frac{B_2 - A_2}{X_a} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{B_1 - A_1}{X_a} \right)$
- $\beta - \gamma = \tan^{-1} \left( \frac{D_2 - A_2}{Y_a} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{D_1 - A_1}{Y_a} \right)$
- $a = A_2 - A_1$
- $b = B_2 - B_1$
- $c = C_2 - C_1$
- $d = D_2 - D_1$

(42 a 47)

### 4.1.3 Equações de alinhamento do teto panorâmico, constituído por um vidro

Procura-se agora chegar às expressões que se aproximam mais do problema real, ao incluir a curvatura do teto panorâmico e do tejadilho.

Através de projeções ortogonais da carroçaria do veículo em estudo, foi possível conceber uma projeção tridimensional virtual do mesmo através do programa *SolidWorks* (Figura 4-10).

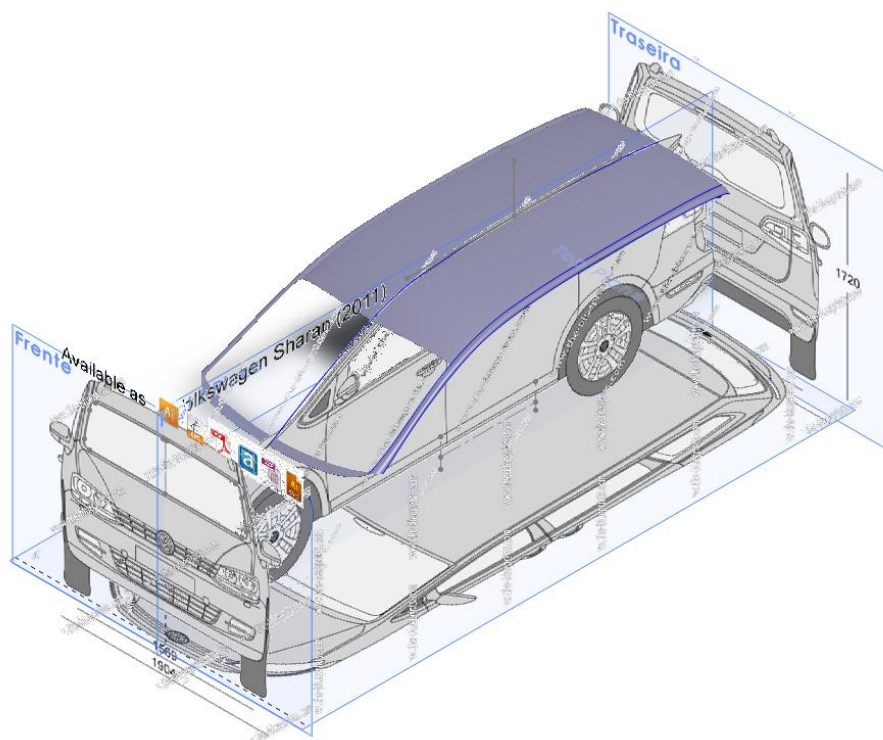


Figura 4-10: Projeção tridimensional do tejadilho

Visto que o *SolidWorks* não está preparado para devolver ao operador funções que definem as superfícies, foi necessário recorrer a métodos de aproximação, com o intuito de obter funções analíticas que representassem o tejadilho e o teto. Do desenho tridimensional realizado, foram retiradas as coordenadas de pontos importantes para a medição e ajuste do teto. Idealmente, opta-se por utilizar um método de aproximação, para obtenção de funções analíticas que contenham os pontos retirados. Embora seja um dos métodos mais conhecidos e utilizados, não foi utilizada a aproximação polinomial, visto não ser possível controlar a curvatura da função entre pontos. Como é possível concluir através da seguinte figura (Figura 4-11), que representa aproximações polinomiais de várias ordens da função de Runge, [13].

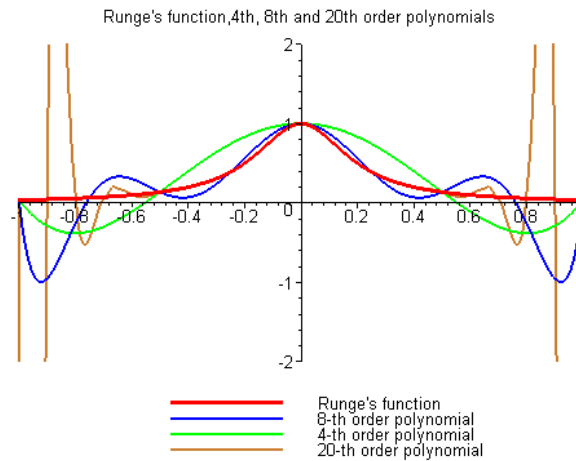


Figura 4-11: Aproximações polinomiais da função da Runge, [13]

Para evitar tais oscilações entre pontos, optou-se por recorrer a interpolações por *splines* cúbicos.

Com o intuito de evitar eventuais confusões na identificação dos pontos, considerou-se o mesmo nome e posicionamento já utilizado na Figura 4-1. Resultando a configuração, presente na Figura 4-12.

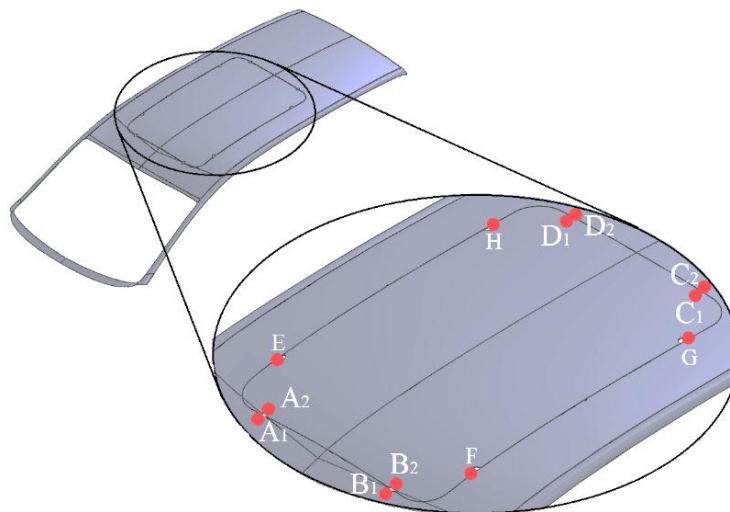


Figura 4-12: Identificação dos pontos de medição e de ajuste com teto e tejadilho com curvatura

Para aproximar o máximo possível da curvatura real do teto e do tejadilho, utilizaram-se seis funções que passam pelas posições dos comparadores. A função  $z_1(y)$ , passa pelos sensores  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$  e  $C_2$ ;  $z_2(x)$  passa por  $A_1$  e  $B_1$ ,  $z_3(x)$  por  $A_2$  e  $B_2$ ,  $z_4(x)$  por  $C_2$  e  $D_2$ ,  $z_5(x)$  por  $C_1$  e  $D_1$  e  $z_6(y)$  por  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $D_1$  e  $D_2$ . Tal como se pode verificar através da seguinte figura (Figura 4-13).

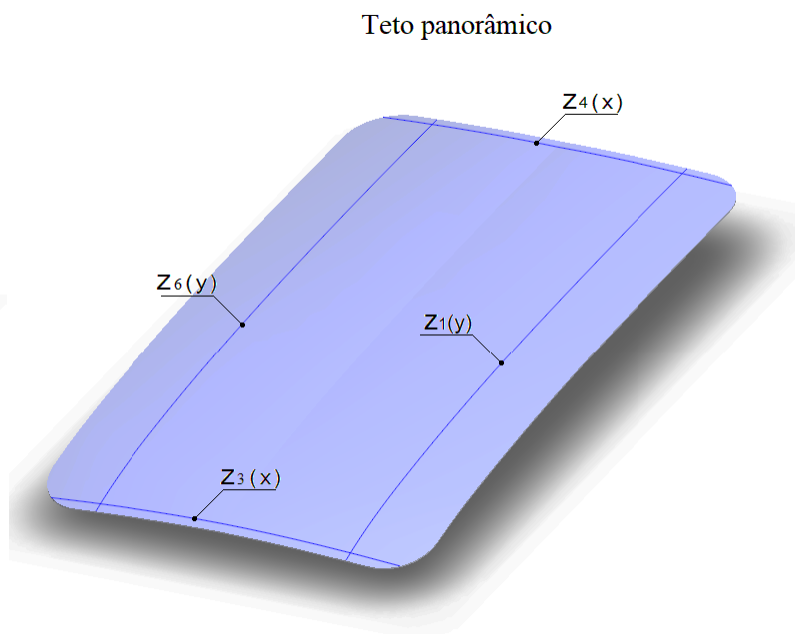
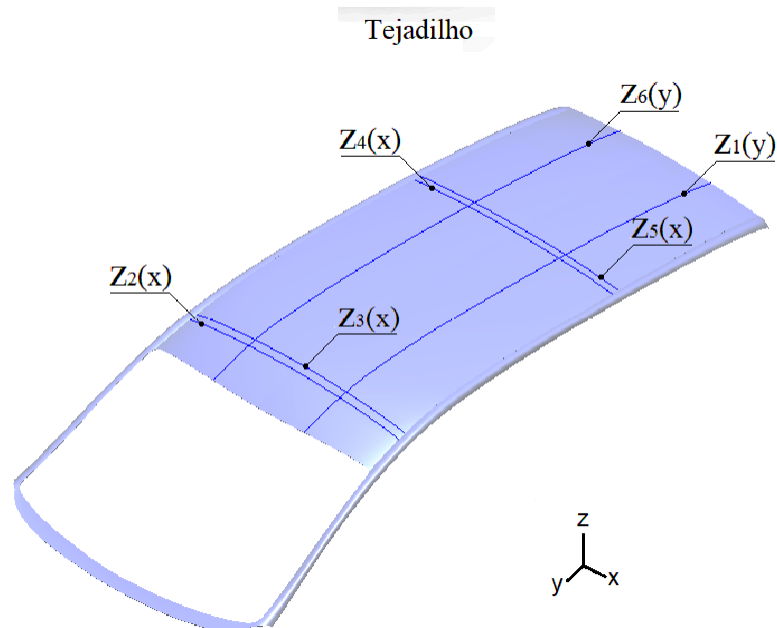


Figura 4-13: Identificação das funções

Uma vez que este método de aproximação requer inúmeros cálculos e segue sempre a mesma metodologia para todos os casos, é apenas necessário demonstrar, passo a passo, umas das funções. Posteriormente, está demonstrado como obter a função de aproximação da curvatura  $z_3(x)$ , que se trata de uma das funções que requer menos pontos, devida ao seu comprimento e simetria.

Para que seja possível aplicar o método de aproximação por *splines* cúbicos, é necessário conhecer pelo menos três pontos pertencentes à superfície do tejadilho. Neste caso, optou-se por utilizar nove pontos<sup>3</sup>, como é possível verificar através da seguinte figura (Figura 4-14). Todos os pontos estão marcados com eixos verticais para que sejam mais facilmente identificados.

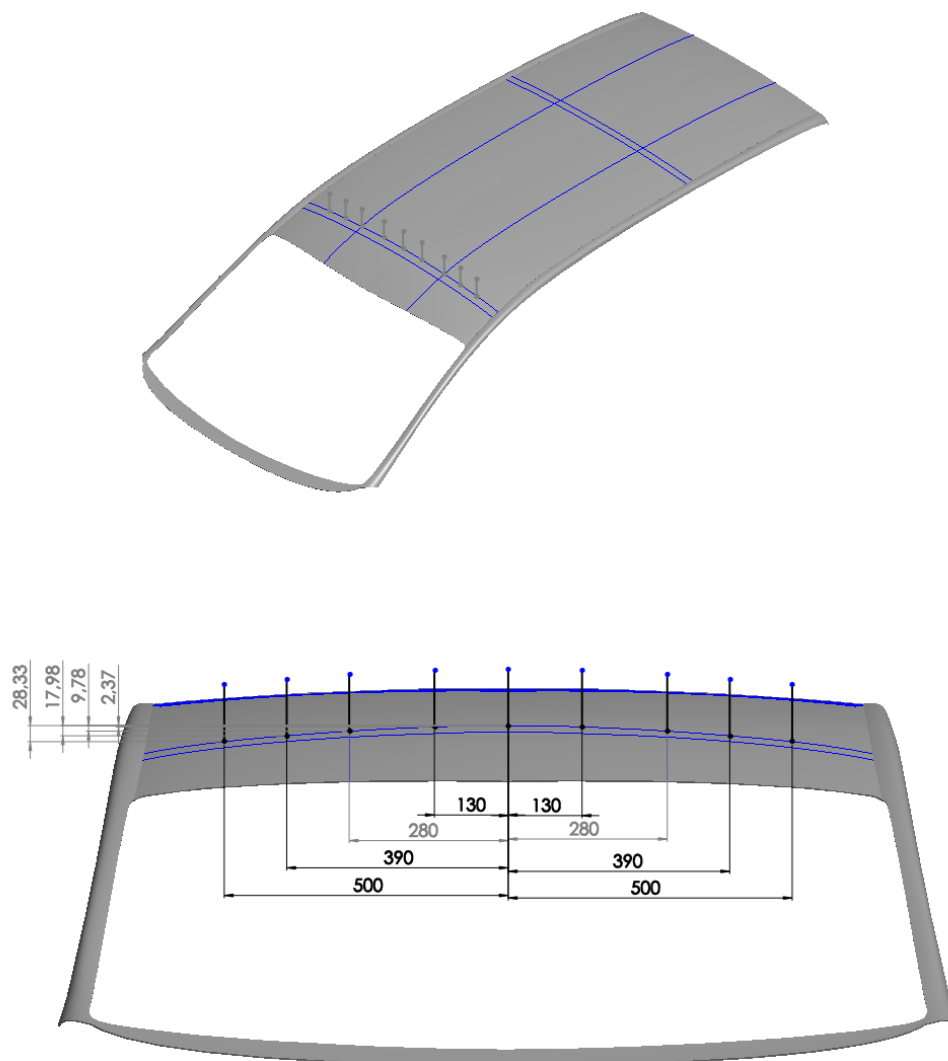


Figura 4-14: Pontos da função  $z_3(x)$

Embora a diferença do ponto de cota máxima para o ponto de cota mínima tenha uma diferença de 28,33 mm, considera-se que o valor da cota superior é equivalente a 50 mm. Assim, caso seja necessário utilizar um ponto mais distante, para realizar alterações no projeto, não existirão pontos com cotas negativas. A mesma metodologia foi utilizada para todas as outras funções.

Retiraram-se então, do modelo tridimensional, os pontos presentes na Tabela 4-2.

<sup>3</sup> Quanto maior for o número de pontos, melhor são as aproximações das funções analíticas da superfície real.

Tabela 4-2: Pontos da função  $z3(x)$ 

Ponto	$x$	$f(x)$	Ponto	$x$	$f(x)$
0	-500	21.673	5	130	47.630
1	-390	32.023	6	280	40.218
2	-280	40.218	7	390	32.023
3	-130	47.630	8	500	21.673
4	0	50			

Através da interpolação por *splines* cúbicos, é possível utilizar um maior número de pontos e obtêm-se melhores resultados entre os mesmos. Isto porque, a função analítica que se obtém é uma função definida por ramos. Este método garante que a função final seja contínua e diferenciável em todos os pontos. Parte também do princípio, que no intervalo de  $[x_{i-1}, x_i]$ , a segunda derivada da função é contínua, a partir da interpolação polinomial de Lagrange:

$$f''_i(x) = f''_i(x_{i-1}) \frac{x - x_i}{x_{i-1} - x_i} + f''_i(x) \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (48)$$

Se se integrar a função anterior duas vezes, conclui-se que as funções analíticas partem da seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
f_i(x) = & \frac{f''_i(x_{i-1})}{6(x_i - x_{i-1})} (x_i - x)^3 + \frac{f''_i(x_i)}{6(x_i - x_{i-1})} (x - x_{i-1})^3 \\
& + \left[ \frac{f_i(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''_i(x_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x_i - x) \\
& + \left[ \frac{f_i(x_i)}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''_i(x_i)(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x - x_{i-1})
\end{aligned} \quad (49)$$

Da equação anterior, existem duas incógnitas:  $f''(x_i)$  e  $f''(x_{i-1})$ . Partindo pela equação 48 e tendo em conta que a função por partes tem de ser diferenciável em todos os pontos, retira-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} f'_{i-1}(x_i) &= f'_i(x_i) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow (x_i - x_{i-1})f''(x_{i-1}) + 2(x_{i+1} - x_{i-1})f''(x_i) + (x_{i+1} - x_i) \\ &= \frac{6}{x_{i-1} - x_i} [f(x_{i+1}) - f(x_i)] + \frac{6}{x_i - x_{i-1}} [f(x_{i-1}) - f(x_i)] \end{aligned} \quad (50)$$

Para que seja possível resolver a equação anterior, admite-se como condições fronteira, que a segunda derivada da função é nula nas extremidades. Isto é:

$$f''(x_0) = f''(x_n) = 0 \quad (51)$$

Conhecidas todas as equações necessárias, é possível proceder com a interpolação por *splines* cúbicos para a função  $z_3(x)$ .

Tendo em conta que a segunda derivada é nula nas extremidades, de acordo com a equação 51, preenche-se a Tabela 4-3 com as segundas derivadas da função  $z_3(x)$  já conhecidas.

Tabela 4-3: Segundas derivadas da função  $z_3(x)$

$x$	$f(x)$	$f''(x)$
-500	21.673	0
-390	32.023	?
-280	40.218	?
-130	47.630	?
0	50	?
130	47.630	?
280	40.218	?
390	32.023	?
500	21.673	0

Para descobrir os valores em falta na tabela anterior (Tabela 4-3), utiliza-se a equação 50, para cada um dos pontos. O que resulta:

Para  $f''(-390)$ :

$$\begin{aligned} & [-390 - (-500)] \times 0 + 2[-280 - (-500)]f''(-390) + [-280 - (-390)]f''(-280) \\ &= \frac{6}{-280 - (-390)}(40.218 - 32.023) + \frac{6}{-390 - (-500)}(21.673 - 32.023) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow 440f''(-390) + 110f''(-280) = -0.118 \end{aligned}$$

Aplicando a mesma equação (50), para os restantes pontos, resultam as seguintes equações:

- Para  $f''(-280)$ :  $110f''(-390) + 520f''(-280) + 150f''(-130) = -0.151$
- Para  $f''(-130)$ :  $150f''(-280) + 560f''(-130) + 130f''(0) = -0.187$
- Para  $f''(0)$ :  $130f''(-130) + 520f''(0) + 130f''(-130) = -0.219$
- Para  $f''(130)$ :  $130f''(0) + 560f''(130) + 150f''(280) = -0.187$
- Para  $f''(280)$ :  $150f''(130) + 520f''(280) + 110f''(390) = -0.151$
- Para  $f''(390)$ :  $110f''(280) + 440f''(390) = -0.118$

Assim, descobrem-se os valores das sete incógnitas, através de um sistema de equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} 440f''(-390) + 110f''(-280) = -0.118 \\ 110f''(-390) + 520f''(-280) + 150f''(-130) = -0.151 \\ 150f''(-280) + 560f''(-130) + 130f''(0) = -0.187 \\ 130f''(-130) + 520f''(0) + 130f''(-130) = -0.219 \\ 130f''(0) + 560f''(130) + 150f''(280) = -0.187 \\ 150f''(130) + 520f''(280) + 110f''(390) = -0.151 \\ 110f''(280) + 440f''(390) = -0.118 \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} f''(-390) = -2.219 \times 10^{-4} \\ f''(-280) = -1.812 \times 10^{-4} \\ f''(-130) = -2.126 \times 10^{-4} \\ f''(0) = -3.144 \times 10^{-4} \\ f''(130) = -2.126 \times 10^{-4} \\ f''(280) = -1.812 \times 10^{-4} \\ f''(390) = -2.219 \times 10^{-4} \end{array} \right.$$

Conhecidos os valores de todas as incógnitas, resta descobrir as funções entre pontos, através da equação 49. Neste caso, como foram retirados nove pontos, são necessárias oito funções para definir a função analítica final.

Resolvendo a equação 49, para  $x = -390$ , obtém-se:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \frac{0}{6[-390 - (-500)]}(-390 - x)^3 + \frac{-2.21845 \times 10^{-4}}{6[-390 - (-500)]}[x - (-500)]^3 \\ &+ \left[ \frac{21.673}{-390 - (-500)} - \frac{0 \times [-390 - (-500)]}{6} \right](-390 - x) \\ &+ \left[ \frac{32.023}{-390 - (-500)} - \frac{-2.21845 \times 10^{-4} \times [-390 - (-500)]}{6} \right][x - (-500)] \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow f_1(x) = -3.361 \times 10^{-7}(x + 500)^3 + 0.197(-390 - x) + 0.295(x + 500) \end{aligned}$$



Resolvendo a equação 49, para os valores  $x = -280, -130, 0, 130, 280, 390$  e  $500$ , obtém-se as restantes partes da função final:

- $f_2(x) = -3.361 \times 10^{-7}(-280 - x)^3 - 2.746 \times 10^{-7}(x + 280)^3 + 0.295(-280 - x) + 0.369(x + 390)$
- $f_3(x) = -2.014 \times 10^{-7}(-130 - x)^3 - 2.362 \times 10^{-7}(x + 280)^3 + 0.273(-130 - x) + 0.323(x + 280)$
- $f_4(x) = -2.725 \times 10^{-7}(-x)^3 - 4.031 \times 10^{-7}(x + 130)^3 + 0.371(-x) + 0.391(x + 130)$
- $f_5(x) = -4.031 \times 10^{-7}(130 - x)^3 - 2.725 \times 10^{-7}x^3 + 0.391(130 - x) + 0.371x$
- $f_6(x) = -2.362 \times 10^{-7}(280 - x)^3 - 2.014 \times 10^{-7}(x - 130)^3 + 0.323(280 - x) + 0.273(x - 130)$
- $f_7(x) = -2.746 \times 10^{-7}(390 - x)^3 - 3.361 \times 10^{-7}(x - 280)^3 + 0.369(390 - x) + 0.295(x - 280)$
- $f_8(x) = -3.361 \times 10^{-7}(500 - x)^3 + 0.195(500 - x) + 0.197(x - 390)$

Conclui-se, assim, a determinação de todas as partes da função aproximada por *splines* cúbicos, analiticamente. Trata-se de um processo demorado que envolve vários cálculos. Porém, não é necessário voltar a repetir os mesmos cálculos analiticamente, visto já existir uma função no programa *MATLAB* que segue o mesmo princípio de funcionamento. Através da função “*csapi*”, obtém-se rapidamente  $f(x)$ , ao introduzir os valores dos pontos retirados do modelo tridimensional.

Uma vez que o veículo é simétrico transversalmente, as funções  $z_1(y)$  e  $z_6(y)$  são equivalentes. Logo, apenas foram criadas cinco funções em *MATLAB*, que têm como entrada os valores ao longo do eixo dos  $xx$ , caso se esteja a trabalhar com  $z_2(x)$ ,  $z_3(x)$ ,  $z_4(x)$ , ou  $z_5(x)$ , e do eixo dos  $yy$  para  $z_1(y)$ . À saída, devolve os valores das ordenadas da função correspondente às respetivas abcissas.

Para  $z_3(x)$ , foram utilizados os pontos já retirados, presentes na tabela 4-1. Para  $z_1(y)$  foram utilizados os pontos presentes nas Figuras 4-15 e 4-16.

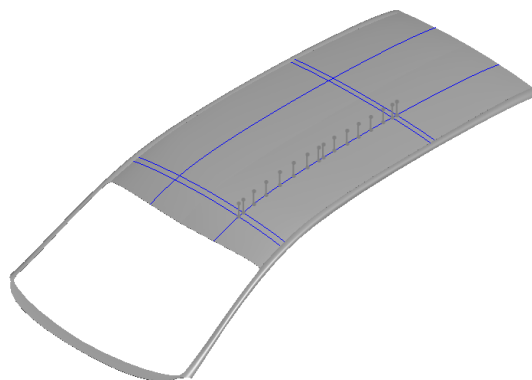


Figura 4-15: Pontos da função  $z_1(y)$  (vista isométrica)

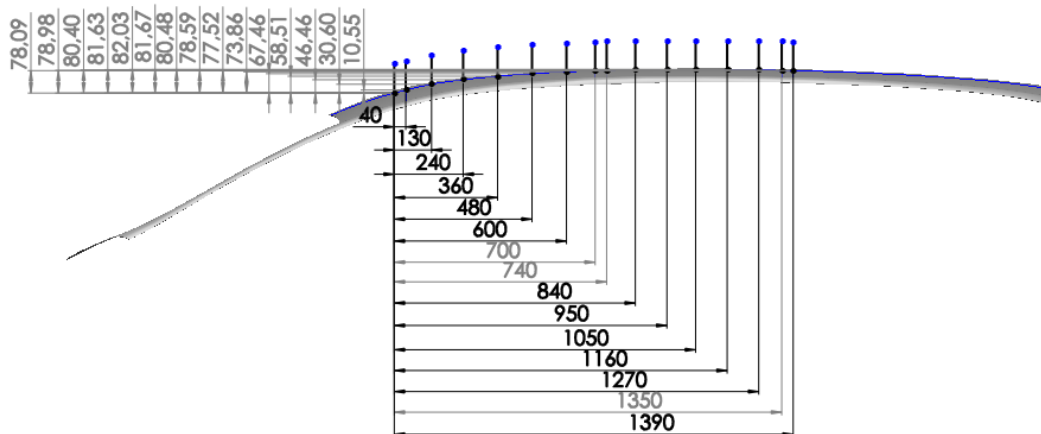


Figura 4-16: Pontos da função  $z_1(y)$  (vista lateral)

Os respectivos pontos estão apresentados na seguinte tabela (Tabela 4-4):

Tabela 4-4: Pontos retirados para  $z_1(y)$

$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
0	0	740	78.587
40	10.549	840	80.484
130	30.605	950	81.674
240	46.460	1050	82.029
360	58.514	1160	81.627
480	67.458	1270	80.401
600	73.863	1350	78.977
700	77.519	1390	78.093

Para  $z_2(\mathbf{x})$ , foram utilizados os pontos apresentados nas Figuras 4-17 e 4-18.

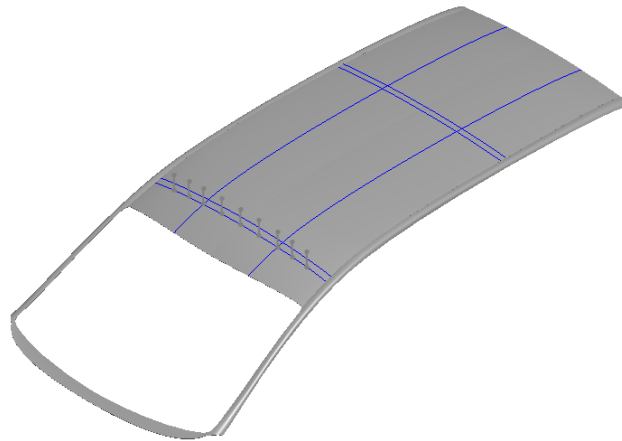


Figura 4-17: Pontos da função  $z_2(x)$  (vista isométrica)

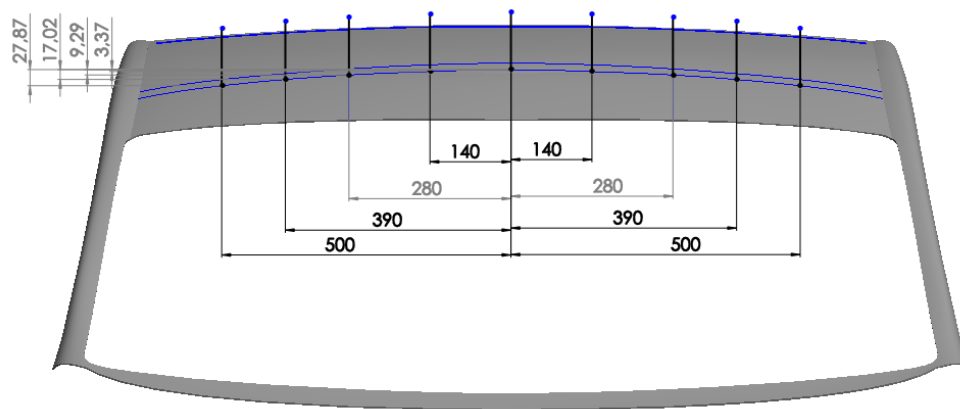


Figura 4-18: Pontos da função  $z_2(x)$  (alçado principal)

Resultando os pontos, presentes na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Pontos retirados para  $z_2(x)$

$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
-500	22.128	140	46.626
-390	32.978	280	40.707
-280	40.707	390	32.978
-140	46.626	500	22.128
0	50		

Para  $z_4(\mathbf{x})$ , utilizaram-se os pontos presentes nas Figuras 4-19 e 4-20.

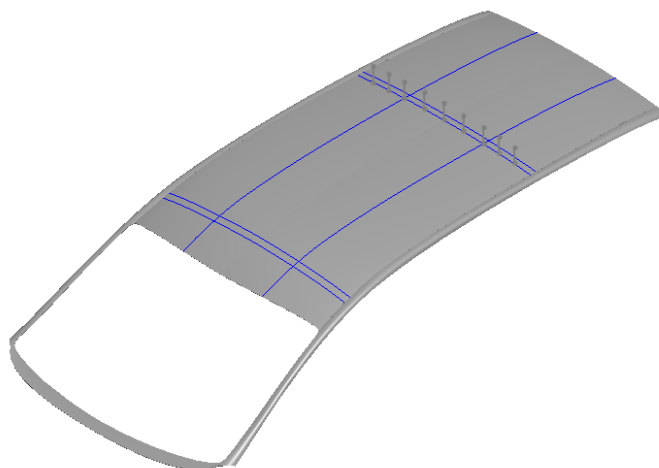


Figura 4-19: Pontos da função  $z_4(x)$  (vista isométrica)

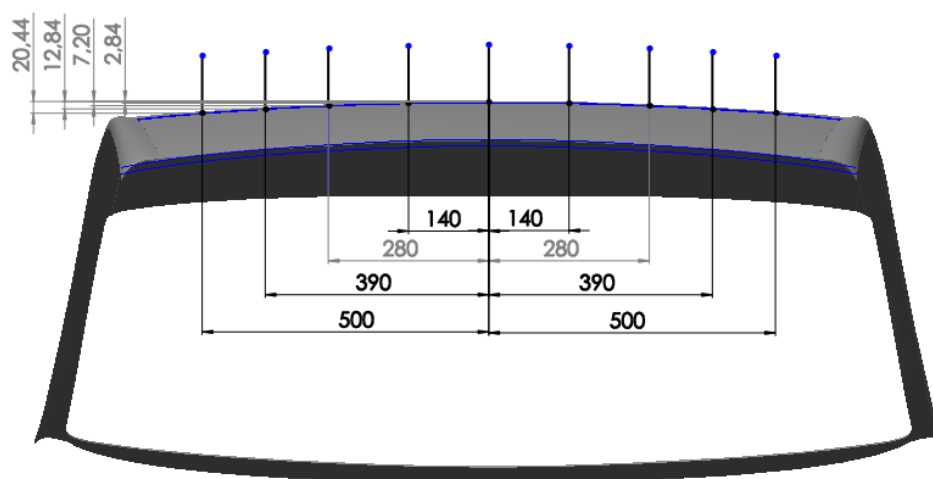


Figura 4-20: Pontos da função  $z_4(x)$  (alçado posterior)

Pontos esses, cujas abcissas e devidas ordenadas estão apresentadas na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Pontos retirados para  $z_4(x)$

$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
-500	29.562	140	47.161
-390	37.156	280	42.798
-280	42.798	390	37.156
-140	47.161	500	29.562
0	50		

E, finalmente, para  $z_5(x)$ , retiraram-se os pontos apresentados nas Figuras 4-21 e 4-22.

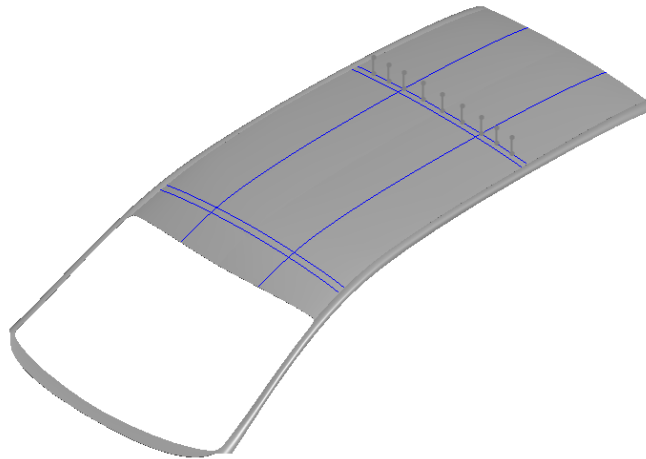


Figura 4-21: Pontos da função  $z5(x)$  (vista isométrica)

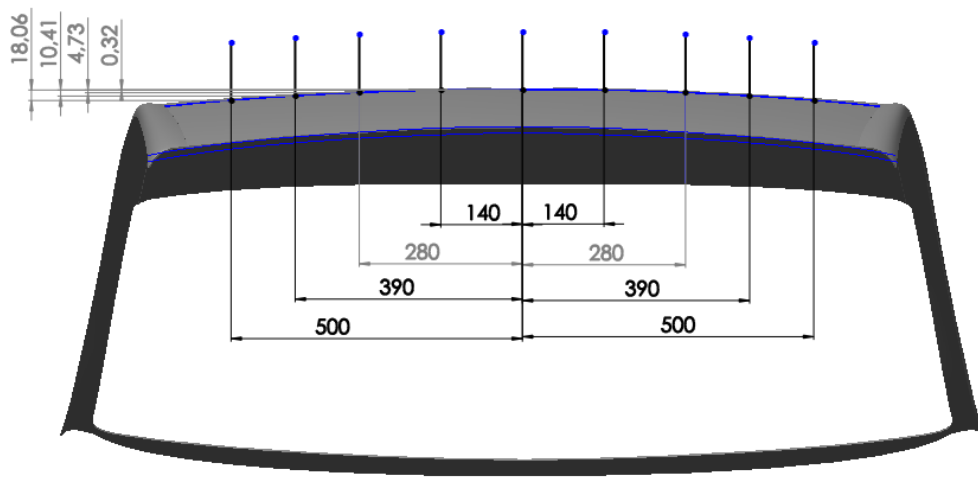


Figura 4-22: Pontos da função  $z5(x)$  (alçado posterior)

Resultando os seguintes pontos, presentes na tabela 4-7.

Tabela 4-7: Pontos retirados para  $z5(x)$

$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
-500	31.944	140	49.682
-390	39.590	280	45.273
-280	45.273	390	39.590
-140	49.682	500	31.944
0	50		

Antes de se proceder com o desenvolvimento das equações de alinhamento, é necessário atualizar a tabela da simbologia com as constantes essenciais e as suas devidas descrições e valores.

Tabela 4-8: Simbologia de constantes essenciais

Simbologia	Descrição	Valor (mm)
<b>YA</b>	Distância do comparador A <sub>2</sub> à origem da função $z_1(y)$	40
<b>YB</b>	Distância do comparador B <sub>2</sub> à origem da função $z_1(y)$	40
<b>YC</b>	Distância do comparador C <sub>2</sub> à origem da função $z_1(y)$	1350
<b>YD</b>	Distância do comparador D <sub>2</sub> à origem da função $z_1(y)$	1350
<b>XA</b>	Distância do comparador A <sub>1</sub> e A <sub>2</sub> à origem da função $z_2(x)$ e $z_3(x)$	-280
<b>XB</b>	Distância do comparador B <sub>1</sub> e B <sub>2</sub> à origem da função $z_2(x)$ e $z_3(x)$	280
<b>XC</b>	Distância do comparador C <sub>1</sub> e C <sub>2</sub> à origem da função $z_4(x)$ e $z_5(x)$	280
<b>XD</b>	Distância do comparador D <sub>1</sub> e D <sub>2</sub> à origem da função $z_4(x)$ e $z_5(x)$	-280
<b>y<sub>a1</sub></b>	Distância dos pontos de ajuste E e F à origem da função $z_1(y)$	220
<b>y<sub>a2</sub></b>	Distância dos pontos de ajuste G e H à origem da função $z_1(y)$	1170
<b>x<sub>a1</sub></b>	Distância dos pontos de ajuste E e F à origem da função $z_2(y)$ e $z_3(x)$	-430
<b>x<sub>a2</sub></b>	Distância dos pontos de ajuste E e F à origem da função $z_4(y)$ e $z_5(x)$	430

Conhecidas as curvaturas do tejadilho e do teto panorâmico, resta adaptar às funções de alinhamento, quando os mesmos foram considerados planos.

Primeiro é necessário conhecer qual a inclinação do teto relativo ao tejadilho. Passo este que se dificultou muito, uma vez que é necessário considerar a curvatura do mesmo. Isto porque um pequeno desvio da carroçaria do veículo relativamente aos sensores, pode afetar os valores medidos e, consequentemente, o processamento dos dados. Outra dificuldade surge por não existir simetria na curvatura do tejadilho e do teto ao longo do comprimento do veículo (ao longo de  $z_1(y)$ ).

Porém, aproveitando o fato de se conhecerem as funções que representam a curvatura e quais os desvios da carroçaria relativamente aos sensores, é possível obter uma boa aproximação do valor do ângulo do teto relativamente ao tejadilho, para pequenos valores de inclinações.

Se for retirado ao valor medido, o valor da multiplicação da altura da curvatura, que é concluído a partir das funções anteriormente calculadas, com o cosseno do próprio ângulo, obtém-se uma reta. A inclinação desta reta representa a inclinação pretendida. Este processo pode ser tanto utilizado para descobrir o valor da inclinação da carroçaria do veículo, tal como a do teto panorâmico. A próxima figura (Figura 4-23) mostra o que acabou de ser referido, para um caso aproximado de  $z_1(y)$ .

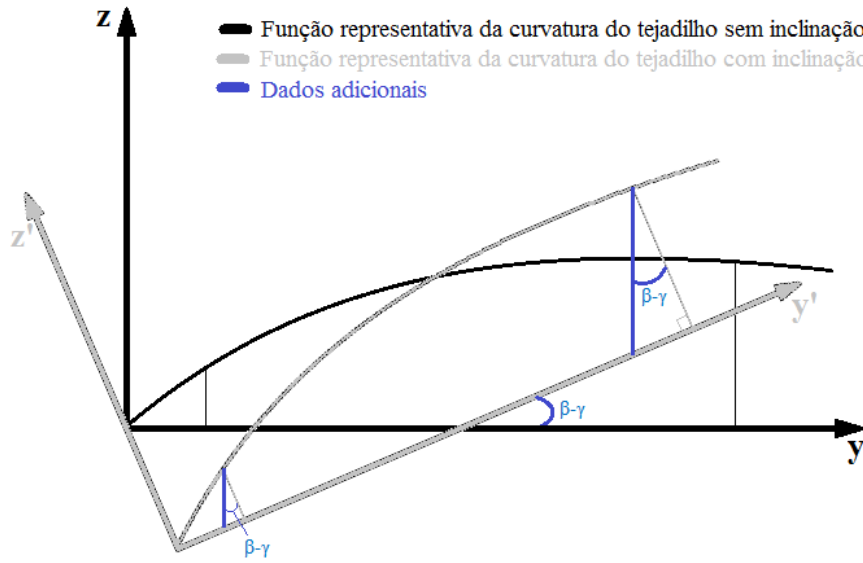


Figura 4-23: Representação da inclinação de uma aproximação de  $z_1(y)$

Embora a multiplicação do valor da altura da curvatura com o cosseno seja o valor real, as inclinações, com que se está a trabalhar, são baixas o suficiente para se poder desprezar o efeito do cosseno na expressão final. Assim, simplifica-se a função e o processo para descobrir qual o valor do ângulo da inclinação.

Como realizado anteriormente, é agora necessário descobrir os valores de  $\alpha-\theta$  (inclinação em torno do eixo dos yy) e de  $\beta-\gamma$  (inclinação em torno do eixo do xx). Para tal foram calculados os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  e  $\gamma$  individualmente, o que resulta:

#### $\theta$ - Inclinação da carroçaria em torno do eixo dos yy

Conhecendo o valor da distância entre os sensores em xx ( $X_a$ ), é possível concluir o valor de  $\theta$ . Para os pontos  $A_1$  e  $B_1$  é utilizada a função que passa pelos mesmos ( $z_2(x)$ ) para obter a melhor aproximação possível. Tal como para os pontos  $C_1$  e  $D_1$  é utilizada a função  $z_5(x)$ .

$$\tan(\theta) = \frac{[B_1 - z_2(X_B)] - [A_1 - z_2(X_A)]}{X_a} = \frac{[D_1 - z_5(X_D)] - [C_1 - z_5(X_C)]}{X_a} \quad (52)$$

#### $\gamma$ - Inclinação da carroçaria em torno do eixo dos xx

Para descobrir o valor de  $\gamma$ , tem-se em conta o valor da distância entre os sensores em yy (1390 mm). Porém, utiliza-se  $z_1(y)$  que passam pelos  $C_1$ ,  $B_1$ . Quanto aos pontos  $A_1$  e  $D_1$ , também é recorre-se à função  $z_1(y)$ , visto ser equivalente a  $z_3(y)$ .

$$\tan(\gamma) = \frac{[D_1 - z_1(1390)] - [A_1 - z_1(0)]}{1390} = \frac{[C_1 - z_1(1390)] - [B_1 - z_1(0)]}{1390} \quad (53)$$

#### $\alpha$ - Inclinação do teto em torno do eixo dos yy

A inclinação do teto em torno do eixo dos yy, conclui-se exatamente através do mesmo método utilizado para descobrir o valor de  $\theta$ , porém recorre-se aos valores diretamente medidos do teto,  $A_2$  e  $B_2$ , ou  $C_2$  e  $D_2$  e às, respetivamente, funções  $z_3(x)$  ou  $z_4(x)$ .

$$\tan(\alpha) = \frac{[B_2 - z_3(X_B)] - [A_2 - z_3(X_A)]}{X_a} = \frac{[D_2 - z_4(X_D)] - [C_2 - z_4(X_C)]}{X_a} \quad (54)$$

#### $\beta$ - Inclinação do teto em torno do eixo dos xx

Finalmente, a inclinação do teto em torno do eixo dos yy, conclui-se através dos valores diretamente medidos do teto,  $A_2$  e  $D_2$ , ou  $B_2$  e  $C_2$ , da função  $z_1(y)$  e tendo em conta que os sensores estão afastados  $Y_a$ .

$$\tan(\beta) = \frac{[D_2 - z_1(Y_D)] - [A_2 - z_1(Y_A)]}{Y_a} = \frac{[C_2 - z_1(Y_C)] - [B_2 - z_1(Y_B)]}{Y_a} \quad (55)$$

Concluídos os valores das inclinações da carroçaria e do teto panorâmico, resta agora descobrir as funções de alinhamento do teto panorâmico curvo.

Como o teto panorâmico e o tejadilho são rígidos e não sofrem deformação durante o processo de alinhamento, o seu comportamento durante o ajuste é semelhante ao alinhamento de dois planos. Neste caso, apenas tem de ser considerado, adicionalmente, o efeito que a curvatura tem nos resultados finais. Isto, porque a constante de curvatura se mantém constante, como está demonstrado na seguinte figura (Figura 4-22).



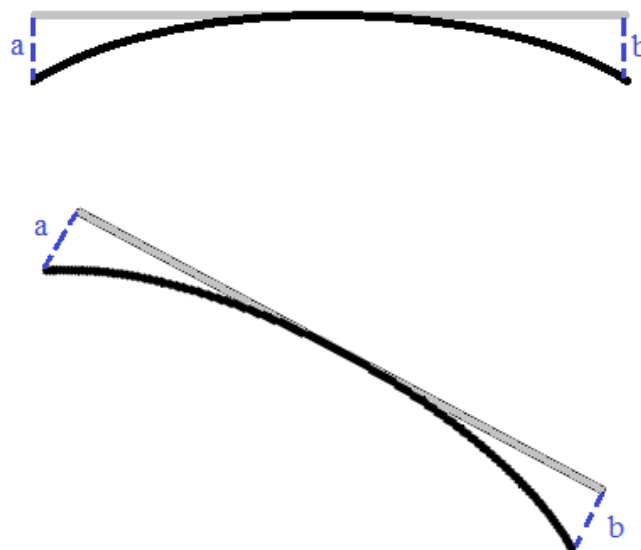


Figura 4-24: Diferença entre uma reta inclinada de uma curva inclinada

Os valores constantes  $a$  e  $b$ , representados na Figura 4-24, apenas sofrem alterações caso a carroçaria não esteja devidamente alinhada com o suporte de comparadores.

Como no alinhamento apenas se está a trabalhar com as componentes verticais, é necessário ter em consideração como a inclinação do teto e do tejadilho afetam as constantes de curvatura.

É ainda importante referir que, tal como as funções de alinhamento concluídas para o teto e tejadilho planos, as funções partem de um ponto onde é realizada a medição, e indicam qual o valor do alinhamento a realizar nos pontos de ajuste.

As funções de alinhamento da superfície superior do teto panorâmico relativamente à superfície do tejadilho, considerando as suas curvaturas, são constituídas por quatro partes:

1. Pelo valor resultante da medição do desalinhamento entre o teto e o tejadilho;
2. Pela diferença entre o desalinhamento nos pontos de medição para os pontos de ajuste, considerando o teto e tejadilho planos;
3. Pelo valor da constante de curvatura entre o ponto de medição e o ponto de ajuste, tendo em consideração a curvatura e as devidas inclinações do teto relativamente ao tejadilho;
4. E, pelo valor da diferença de referencial do ponto de medição para o ponto de ajuste.

Da lista anterior, os dois primeiros pontos resultam das expressões já concluídas para o teto e tejadilhos planos. Então, as duas primeiras partes das novas equações de alinhamento são equivalentes às funções 38, 39, 40 e 41.

Segue-se para o terceiro passo da lista anterior. É necessário retirar ou adicionar a curvatura do tejadilho e do teto que existe desde o ponto de medição até ao ponto de ajuste. Como já foi referido, que a constante de curvatura é afetada pela inclinação do teto relativamente ao tejadilho.

A seguinte figura (Figura 4-25) retrata como uma inclinação de ângulo  $\theta$  de uma curva afeta a componente vertical da constante de curvatura, de valor  $a$ .

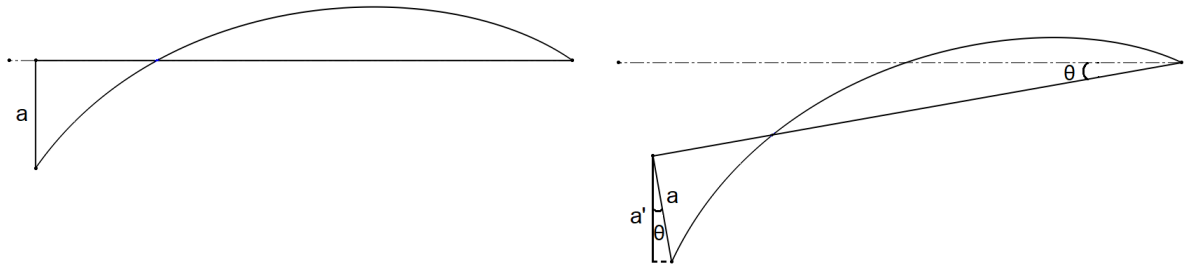


Figura 4-25: Efeitos de uma inclinação na componente vertical da constante de curvatura

Através da figura anterior (Figura 4-23) conclui-se que é necessário multiplicar o cosseno do ângulo  $\theta$  para obter o valor da componente vertical da constante da curvatura.

Conhecidas as funções da curvatura do teto e do tejadilho, sabe-se quais os valores das constantes de curvatura entre os pontos de medição e os pontos de ajuste. Transversalmente, ao longo da largura do veículo (ao longo do plano XOZ), são equivalentes a:

- Para o ponto E:  $z_3(XE) - z_3(XA)$ ;
- Para o ponto F:  $z_3(XF) - z_3(XB)$ ;
- Para o ponto G:  $z_4(XG) - z_4(XC)$ ;
- E, para o ponto H:  $z_4(XH) - z_4(XD)$ .

(56 a 59)

Longitudinalmente, ao longo do comprimento do veículo (Plano YOZ), são equivalentes a:

- Para o ponto E:  $z_1(YE) - z_1(YA)$ ;
- Para o ponto F:  $z_1(YF) - z_1(YB)$ ;
- Para o ponto G:  $z_1(YG) - z_1(YC)$ ;
- E, para o ponto H:  $z_1(YH) - z_1(YD)$ .

(60 a 63)

Assim, os valores finais das constantes de curvatura dos pontos de medição para os pontos de ajuste, tendo em consideração as inclinações do teto panorâmico relativamente ao tejadilho, equivalem a:

- Para o ponto E:  $[z_3(XE) - z_3(XA)] \times \cos(\alpha - \theta) + [z_1(YE) - z_1(YA)] \times \cos(\beta - \gamma)$
  - Para o ponto F:  $[z_3(XF) - z_3(XB)] \times \cos(\alpha - \theta) + [z_1(YF) - z_1(YB)] \times \cos(\beta - \gamma)$
  - Para o ponto G:  $[z_4(XG) - z_4(XC)] \times \cos(\alpha - \theta) + [z_1(YG) - z_1(YC)] \times \cos(\beta - \gamma)$
  - E, para o ponto H:  $[z_4(XH) - z_4(XD)] \times \cos(\alpha - \theta) + [z_1(YH) - z_1(YD)] \times \cos(\beta - \gamma)$
- (64 a 67)

Porém, as equações de alinhamento ficam incompletas caso não se tenha em consideração o quarto passo, que se trata do cálculo do valor da diferença de referencial do ponto de medição para o ponto de ajuste. É necessário calcular este valor, visto que o ponto de ajuste tem um valor de cota diferente do ponto de medição, mesmo quando não existem desalinhamentos.

É então, necessário retirar o valor destas constantes que, ao longo do comprimento do veículo, equivalem a:

- Para o ponto E:  $z_1(YE)$ ;
  - Para o ponto F:  $z_1(YF)$ ;
  - Para o ponto G:  $z_1(YG) - z_1(1390)$ ;
  - E, para o ponto H:  $z_1(YH) - z_1(1390)$ .
- (68 a 71)

Ao longo da largura do veículo, os valores das constantes são exatamente equivalentes às constantes de curvatura já concluídas (equações 56, 57, 58 e 59). Porém, desta vez, não é necessário ter em conta os valores das inclinações do teto e do tejadilho.

Logo, os valores necessários de retirar à função para acertar do referencial dos pontos de medição para os pontos de ajuste são:

- Para o ponto E:  $z_1(YE) + [z_3(XE) - z_3(XA)]$
  - Para o ponto F:  $z_1(YF) + [z_3(XF) - z_3(XB)]$
  - Para o ponto G:  $[z_1(YG) - z_1(1390)] + [z_4(XG) - z_4(XC)]$
  - E, para o ponto H:  $[z_1(YH) - z_1(1390)] + [z_4(XH) - z_4(XD)]$
- (72 a 75)

Concluídas todas as partes da função de alinhamento do teto panor mico, resta juntar tudo obtendo-se as seguintes equa  es:

- $e = a - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) + \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma) + [z_3(XE) - z_3(XA)] \times \cos(\alpha - \theta) + [z_1(YE) - z_1(YA)] \times \cos(\beta - \gamma) - [z_1(YE) + [z_3(XE) - z_3(XA)]]$
- $f = b + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) + \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma) + [z_3(XF) - z_3(XB)] \times \cos(\alpha - \theta) + [z_1(YF) - z_1(YB)] \times \cos(\beta - \gamma) - [z_1(YF) + [z_3(XF) - z_3(XB)]]$
- $g = c + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) - \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma) + [z_4(XG) - z_4(XC)] \times \cos(\alpha - \theta) + [z_1(YG) - z_1(YC)] \times \cos(\beta - \gamma) - [z_1(YG) - z_1(1390)] + [y_4(XG) - y_4(XC)]$
- $h = d - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha - \theta) - \left[ \frac{1}{2}(Y_a - Y) + \Delta y \right] \times \tan(\beta - \gamma) + [z_4(XH) - y_4(XD)] \times \cos(\alpha - \theta) + [z_1(YH) - z_1(YD)] \times \cos(\beta - \gamma) - [z_1(YH) - z_1(1390)] + [z_4(XH) - z_4(XD)]$

Onde:

(76 a 79)

- $\alpha - \theta = \tan^{-1} \left( \frac{B_2 - A_2}{X_a} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{B_1 - A_1}{X_a} \right)$
- $\beta - \gamma = \tan^{-1} \left( \frac{D_2 - A_2}{Y_a} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{D_1 - A_1}{Y_a} \right)$
- $a = A_2 - A_1$
- $b = B_2 - B_1$
- $c = C_2 - C_1$
- $d = D_2 - D_1$
- 

(80 a 85)

#### 4.1.4 Equações de alinhamento finais do teto panorâmico

Para simplificação do problema, foi considerado que o teto panorâmico era apenas constituído por um vidro. Porém, no caso real este é composto por dois vidros e ambos necessitam de estar alinhados com o tejadilho do veículo para preservar a aerodinâmica do veículo.

Uma vez que o teto é composto por duas partes, existirão, seis pontos de ajuste e doze pontos de medição.

Oitos dos pontos de medição situam-se na mesma posição e têm as mesmas designações utilizadas nas equações de alinhamento com teto único ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$  e  $D_2$ ). Os novos quatro pontos de medição localizam-se junto à extremidade existente entre vidros ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $J_1$  e  $J_2$ ).

Tal como os pontos de medição, continuam a existir os quatros de ajuste ( $E$ ,  $F$ ,  $G$  e  $H$ ). E passam a existir dois novos pontos de ajuste entre as duas partes do teto panorâmico ( $K$  e  $L$ ). Tal como está ilustrado na Figura 4-26.

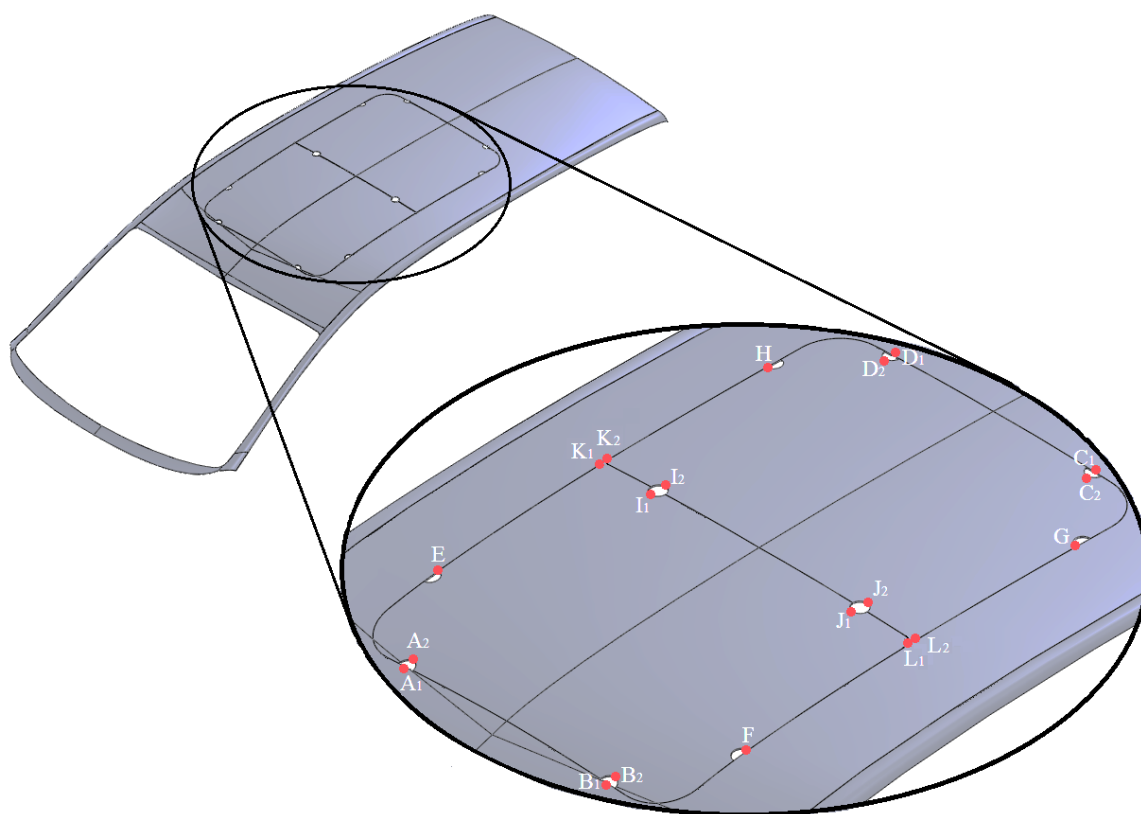


Figura 4-26: Identificação dos pontos de medição e de ajuste do teto e tejadilho

Como existem novos pontos de medição e de ajuste, é necessário adicionar mais duas novas funções de curvatura para que seja possível obter equações de alinhamento que se aproximem o máximo possível do caso real. Assim, surge  $z_7(x)$  que passa pelos pontos  $I_1$  e  $J_1$ , e  $z_8(y)$ , que passa pelos pontos  $I_2$  e  $J_2$ . Na próxima figura (Figura 4-27) estão representadas todas as funções necessárias para o desenvolvimento das equações de alinhamento do teto panorâmico.

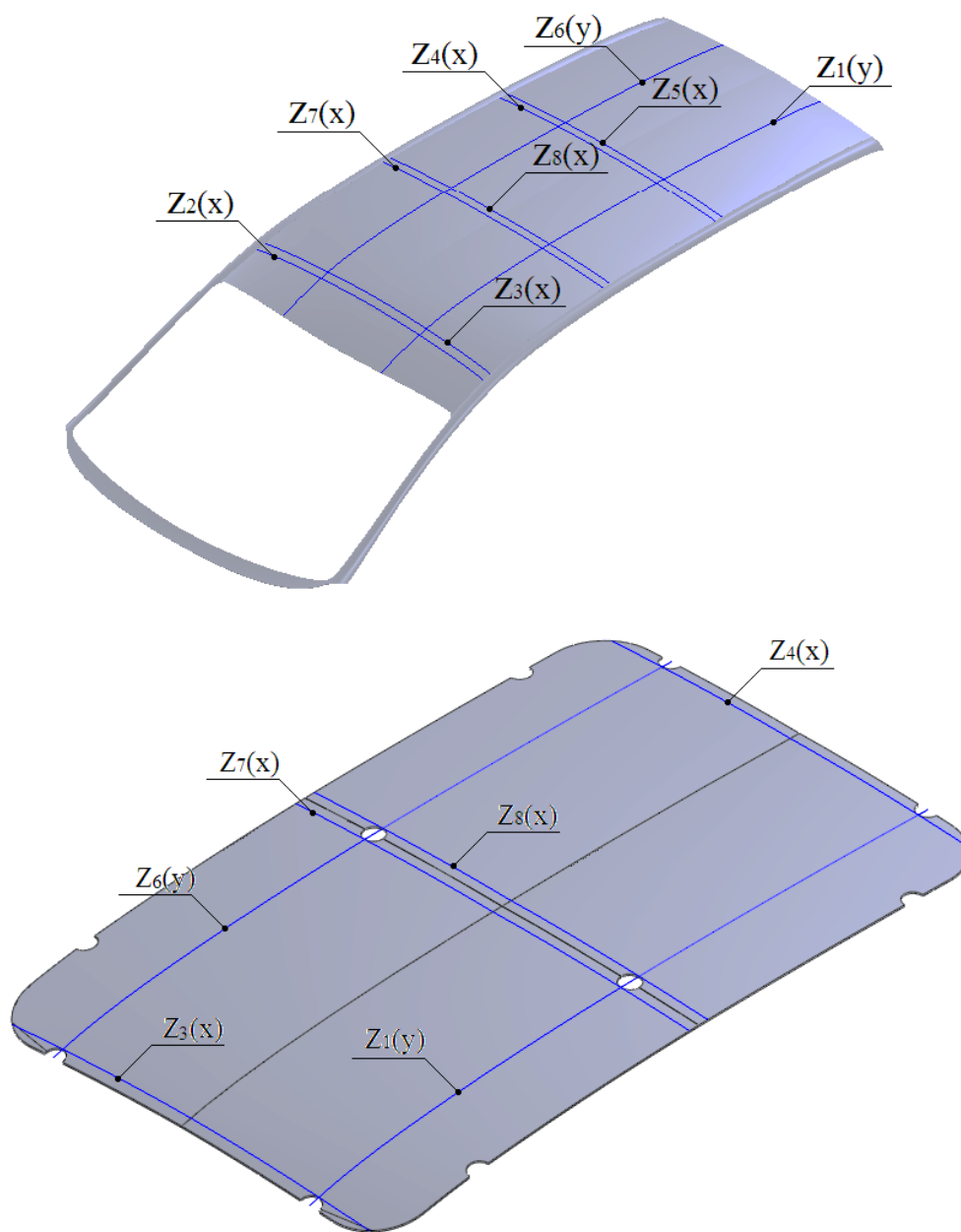


Figura 4-27: Identificação das funções finais

Seguindo a mesma metodologia já utilizada, retiram-se os pontos da curva que passa pelos pontos  $I_1$  e  $J_1$ , e da curva que passa pelos pontos  $I_2$  e  $J_2$ , para que seja possível obter uma aproximação das funções  $z_7(x)$  e  $z_8(x)$ , respetivamente. Mais uma vez, utilizou-se a função “*csapi*” no programa *MATLAB*, que devolve imediatamente os valores das ordenadas das respetivas abcissas das funções pretendidas.

Assim, foram retirados os pontos para a função  $z_7(\mathbf{x})$ , apresentados nas Figuras 4-28 e 4-29.

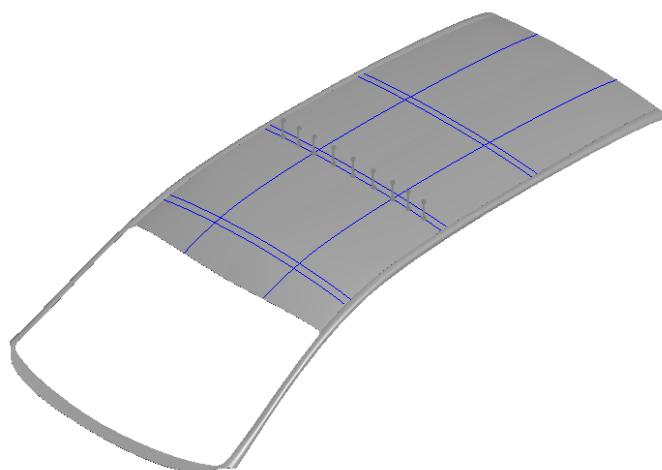


Figura 4-28: Pontos da função  $z_7(x)$  (vista isométrica)

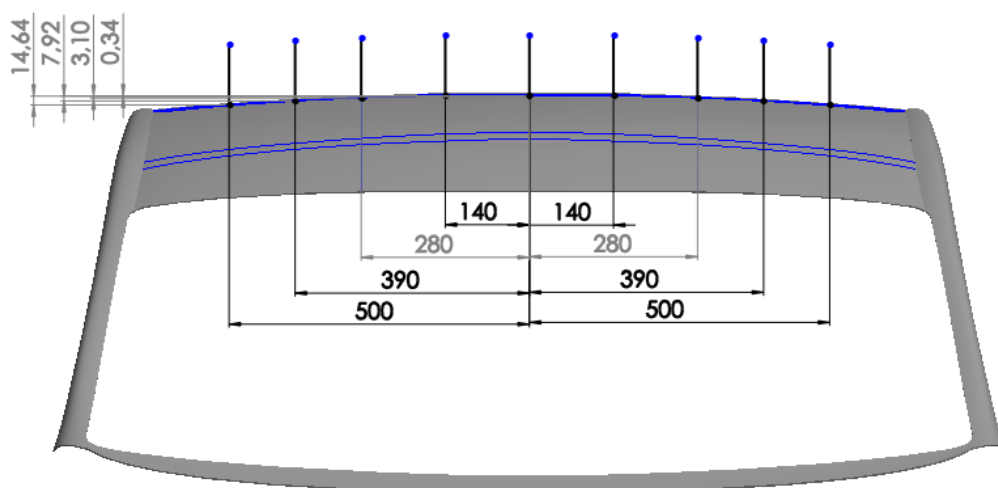


Figura 4-29: Pontos da função  $z_7(x)$  (alçado principal)

Resultando os seguintes pontos para a função analítica  $z_7(x)$ , presentes na Tabela 4-9.

Tabela 4-9: Pontos retirados para  $z_7(x)$

$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
-500	10.361	140	24.660
-390	17.081	280	21.897
-280	21.897	390	17.081
-140	24.660	500	10.361
0	25		

Para  $z_8(\mathbf{x})$ , foram retirados pontos apresentados nas Figuras 4-30 e 4-31, do modelo tridimensional:

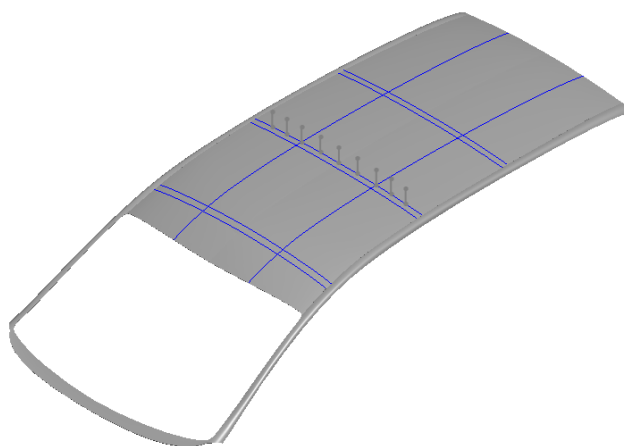


Figura 4-30: Pontos da função  $z_8(x)$  (vista isométrica)

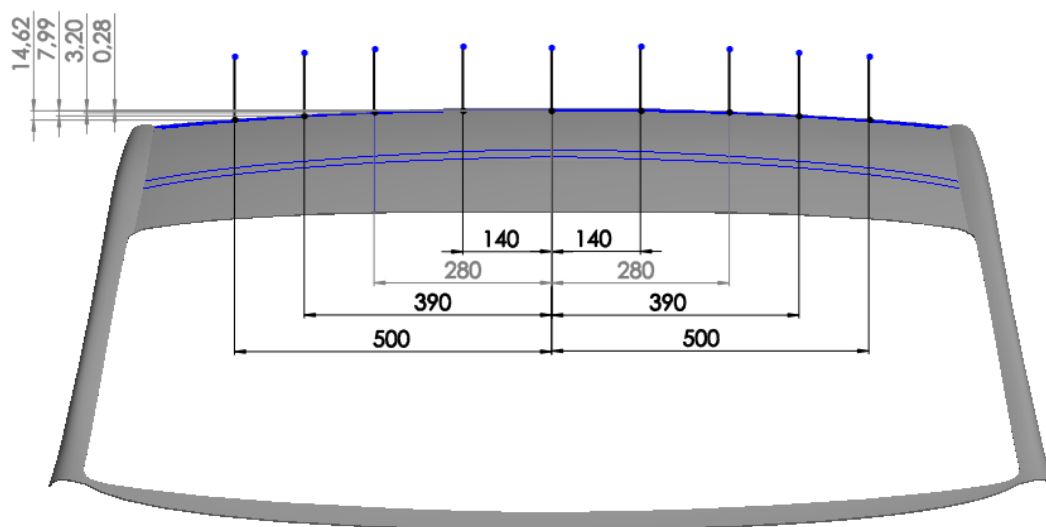


Figura 4-31: Pontos da função  $z_8(x)$  (alçado principal)

Resultando, finalmente, os pontos para  $z_8(x)$ , presentes na Tabela 4-10.

Tabela 4-10: Pontos retirados para  $z_8(x)$

$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
-500	10.377	140	24.720
-390	17.010	280	21.802
-280	21.802	390	17.010
-140	24.720	500	10.377
0	25		



Conhecidas as funções representativas das curvaturas do tejadilho e do teto panorâmico, procede-se com o desenvolvimento das equações de alinhamento dos dois vidros.

Segue-se pela mesma ideologia já utilizada para descobrir as funções de alinhamento do teto único, porém passará a existir uma nova dificuldade. Durante a medição do desalinhamento do teto panorâmico, composto por apenas um vidro, utilizaram-se sempre dois comparadores por ponto. Enquanto um dos comparadores media a distância ao tejadilho, o outro media a distância ao teto panorâmico. Este processo simplificava o processamento de dados, porque facilmente se obtinha o valor do desalinhamento nesse ponto de medição. Assim assegurava-se que por cada ponto de medição, existia uma referência próxima resultante da medição da distância ao tejadilho.

No caso em estudo, existem dois pontos, I e J, cujas medições são ambas realizadas no vidro do teto panorâmico. Isto porque esses pontos de medição não se encontram nas proximidades do tejadilho, para servir de referência, como se pode verificar através da Figura 4-25.

Conhecendo as funções de curvatura do tejadilho e do teto, e tendo em conta que não existe deformação dos mesmos durante o processo de alinhamento, facilmente se resolve este problema ao considerar um ponto mais distante do tejadilho, como ponto de referência.

Com o intuito de reduzir custos de projeto, aproveitam-se os quatro sensores já existentes, que medem a distância ao tejadilho:  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  e  $D_1$ .

Como se está a trabalhar com um teto panorâmico constituído por duas partes, novas incógnitas foram consideradas. Como os dois vidros são independentes um do outro, as suas inclinações em torno do eixo dos  $xx$  e do eixo dos  $yy$ , também são independentes. Então, as incógnitas e certas constantes relativas ao teto panorâmico sofrem alterações, mas por outro lado, as incógnitas relativas ao tejadilho mantêm-se equivalentes.

Deixa de ser necessário ter em consideração a inclinação do teto em torno do eixo dos  $xx$  ( $\beta$ ) e do eixo dos  $yy$  ( $\alpha$ ), a distância entre os pontos de ajuste no eixo dos  $yy$  ( $Y$ ) e a distância entre os sensores do sistema no eixo dos  $yy$  ( $Y_a$ ). Todas as outras incógnitas e constantes presentes na tabela da simbologia (Tabela 4-11) são necessárias para o desenvolvimento das equações de alinhamento finais.

Tabela 4-11: Atualização da simbologia para o caso final

Simbologia	Descrição	Valor (mm)
$k_1$	Desalinhamento do vidro frontal do teto relativamente ao tejadilho no ponto K	–
$k_2$	Desalinhamento do vidro traseiro do teto relativamente ao tejadilho no ponto K	–
$l_1$	Desalinhamento do vidro frontal do teto relativamente ao tejadilho no ponto L	–
$l_2$	Desalinhamento do vidro traseiro do teto relativamente ao tejadilho no ponto L	–
$\alpha_1$	Ângulo de inclinação do vidro frontal do teto em torno do eixo dos yy	–
$\alpha_2$	Ângulo de inclinação do vidro traseiro do teto em torno do eixo dos yy	–
$\beta_1$	Ângulo de inclinação do vidro frontal do teto em torno do eixo dos xx	–
$\beta_2$	Ângulo de inclinação do vidro traseiro do teto em torno do eixo dos xx	–
$Y_1$	Distância entre os pontos de ajuste no eixo dos yy no vidro frontal do teto	500
$Y_2$	Distância entre os pontos de ajuste no eixo dos yy no vidro traseiro do teto	450
$Y_{a1}$	Distância entre os sensores no eixo dos yy no vidro frontal do teto	660
$Y_{a2}$	Distância entre os sensores no eixo dos yy no vidro traseiro do teto	610
$YI1$	Distância do comparador $I_1$ à origem da função $z_1(y)$	700
$YI2$	Distância do comparador $I_2$ à origem da função $z_1(y)$	740
$YJ1$	Distância do comparador $J_1$ à origem da função $z_1(y)$	700
$YJ2$	Distância do comparador $J_2$ à origem da função $z_1(y)$	740
$y_{a3}$	Distância dos pontos de ajuste K e L à origem da função $z_1(y)$	700

Para que seja possível começar com o desenvolvimento das equações de alinhamento finais é necessário descobrir os valores das inclinações da carroçaria e de ambos os vidros do teto panorâmico.

Uma vez que não sofrem quaisquer alterações, relativamente ao alinhamento do teto panorâmico composto por apenas por um vidro, os valores das suas inclinações ( $\theta$  e  $\gamma$ ) são calculados exatamente da mesma maneira (Expressão 52 e 53)

Resta agora descobrir como obter os valores de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$ . Para tal, segue-se pela mesma ideologia utilizada nos casos anteriores.

#### $\alpha_1$ - Inclinação do vidro frontal do teto em torno do eixo dos yy

A inclinação do vidro frontal do teto em torno do eixo dos yy, conclui-se tal como se descobriu o valor de  $\alpha$ , recorrendo aos valores medidos que passam pelas a função  $z_3(x)$  ou pela função  $z_7(x)$ ,  $A_2$  e  $B_2$ , ou  $I_1$  e  $J_1$ , respetivamente.

$$\tan(\alpha_1) = \frac{[B_2 - z_3(X_B)] - [A_2 - z_3(X_A)]}{X_a} = \frac{[I_1 - z_7(X_I)] - [J_1 - z_7(X_J)]}{X_a} \quad (86)$$

#### $\alpha_2$ - Inclinação do vidro frontal do teto em torno do eixo dos yy

Tal e qual como foi calculado  $\alpha_1$ , calcula-se o valor de  $\alpha_2$ . Porém, recorre-se aos valores medidos que passam pelas a função  $z_4(x)$  ou pela função  $z_8(x)$ ,  $C_2$  e  $D_2$ , ou  $I_2$  e  $J_2$ , respetivamente.

$$\tan(\alpha_2) = \frac{[D_2 - z_4(X_D)] - [C_2 - z_4(X_C)]}{X_a} = \frac{[I_2 - z_8(X_I)] - [J_2 - z_8(X_J)]}{X_a} \quad (87)$$

#### $\beta_1$ - Inclinação do teto em torno do eixo dos xx

A inclinação do vidro frontal do teto em torno do eixo dos yy, conclui-se, tal como  $\alpha_1$ , porém tem-se em consideração os valores relativos ao plano YOZ. Assim, através dos valores diretamente medidos do vidro frontal do teto,  $A_2$  e  $B_2$ , ou  $I_1$  e  $J_1$ , da função  $z_1(y)$  e tendo em conta que os sensores estão afastados  $Y_{a1}$ , resulta:

$$\tan(\beta_1) = \frac{[I_1 - z_1(Y_{I1})] - [A_2 - z_1(Y_A)]}{Y_{a1}} = \frac{[J_1 - z_1(Y_{J1})] - [B_2 - z_1(Y_B)]}{Y_{a1}} \quad (88)$$

#### $\beta_2$ - Inclinação do teto em torno do eixo dos xx

Finalmente, a inclinação do vidro traseiro do teto em torno do eixo dos yy, conclui-se exatamente pela mesma metodologia utilizada para  $\beta_1$ , porém através dos valores diretamente medidos do teto,  $C_2$ ,  $D_2$ ,  $I_2$  e  $J_2$ , da função  $z_1(y)$  e tendo em conta que os sensores estão afastados  $Y_{a2}$ , obtém-se:

$$\tan(\beta_2) = \frac{[D_2 - z_1(Y_D)] - [I_2 - z_1(Y_A)]}{Y_{a2}} = \frac{[C_2 - z_1(Y_C)] - [J_2 - z_1(Y_B)]}{Y_{a2}} \quad (89)$$

Concluídos todos os valores das inclinações, tanto da carroçaria, como de ambos os vidros do teto panorâmico, é possível proceder com o desenvolvimento das equações finais de alinhamento do teto panorâmico.

No caso em estudo, como foi referido, os pontos  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $J_1$  e  $J_2$ , não existem pontos do tejadilho próximos para servir de referência, como é o caso de  $A_1$  para  $A_2$ , ou  $B_1$  para  $B_2$ . Para solucionar este problema, utiliza-se o valor medido  $D_1$  como referência para  $I_1$ ,  $A_1$  para  $I_2$ ,  $C_1$  para  $J_1$  e  $B_1$  para  $J_2$ .

As novas equações de alinhamento são constituídas pelas quatro partes mencionadas no subcapítulo anterior. A primeira parte da equação, correspondente ao valor resultante da medição do desalinhamento entre o teto e o tejadilho, permanece equivalente para os pontos A, B, C e D. Porém, para os valores dos desalinhamentos nos pontos I e J ( $i_1$ ,  $i_2$ ,  $j_1$  e  $j_2$ , respetivamente), não podem ser calculados pelo mesmo método, por não existir tejadilho nas proximidades dos mesmos. Como foi referido anteriormente, utiliza-se os pontos de referência resultantes de medidas diretas no tejadilho que são efetuadas pelos sensores  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  e  $D_1$ . Resultando, então:

- $i_1 = I_1 - D_1$ ;
  - $i_2 = I_2 - A_1$ ;
  - $j_1 = J_1 - C_1$ ;
  - $j_2 = J_2 - B_1$ ;
- (90 a 93)

A segunda parte, correspondente ao cálculo do valor de desalinhamento nos pontos de ajuste, considerando o teto e tejadilho planos, também sofre alterações.

Embora a ideologia relativamente ao plano XOZ seja equivalente, visto que o teto apenas foi repartido ao longo do comprimento do veículo, para o plano YOZ, as incógnitas  $Y_a$  e  $Y$  sofrem alterações, afetando a expressão 28. Então, é necessário relacionar novamente  $Y_1$  a  $Y_1'$ . Para tal, tem de se realizar uma nova avaliação de modo a recriar o gráfico representado pela Figura 4-5, adaptando ao novo caso. A próxima figura (Figura 4-32) representa o caso atual, onde o ponto de ajuste se encontra na extremidade do vidro frontal do teto. Esta alteração afeta as variáveis  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_1'$  e  $Y_2'$ .

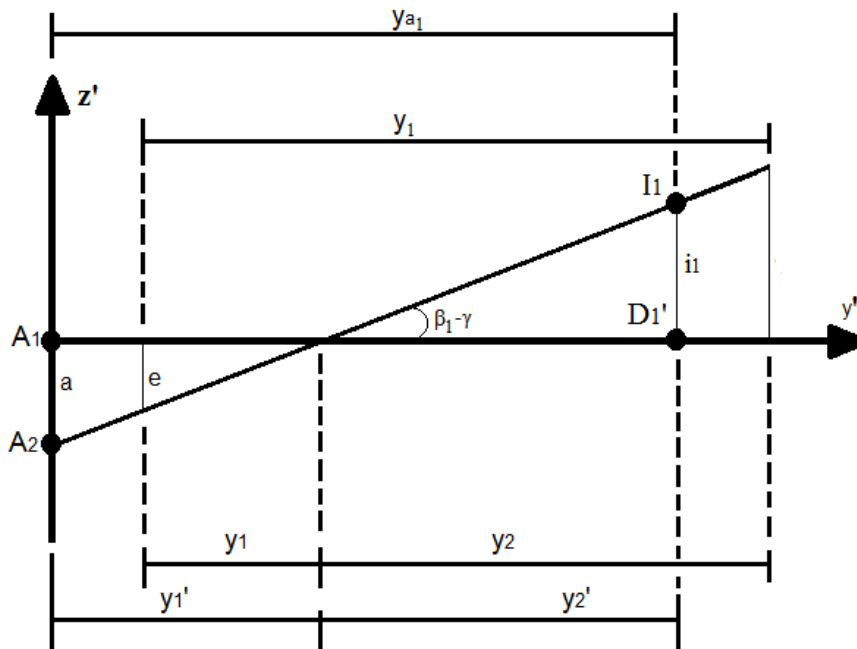


Figura 4-32: Inclinação do vidro frontal do teto relativamente ao tejadilho (Pano  $Y'O'Z'$ )

Através da figura anterior (Figura 4-30) é possível verificar que a diferença entre  $Y_1$  e  $Y_1'$ , e  $Y_2$  e  $Y_2'$ , corresponde à distância entre o sensor ao respectivo ponto de ajuste mais próximo.

Atualizando, então, a expressão 28, resulta para o ponto de ajuste E:

$$y_1 = y_1' + (y_{a1} - YA) \quad (94)$$

Pela mesma ideologia, utilizada no subcapítulo 4.1.2, as equações do alinhamento, caso ambos os vidros e o tejadilho fossem planos, seriam equivalentes a:

- $e = a - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) + [y_{a1} - YA + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma)$
- $f = b + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) + [y_{a1} - YB + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma)$
- $g = c + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_2 - \theta) - [YC - y_{a2} + \Delta y] \times \tan(\beta_2 - \gamma)$
- $h = d - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_2 - \theta) - [YD - y_{a2} + \Delta y] \times \tan(\beta_2 - \gamma)$
- $k_1 = i_1 - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) + [y_{a3} - YI1 + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma)$
- $k_2 = i_2 - \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_2 - \theta) - [YI2 - y_{a3} + \Delta y] \times \tan(\beta_2 - \gamma)$
- $l_1 = j_1 + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) + [y_{a3} - YJ1 + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma)$
- $l_2 = j_2 + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_2 - \theta) - [YJ2 - y_{a3} + \Delta y] \times \tan(\beta_2 - \gamma)$

(95 a 102)

Conhecendo as expressões de alinhamento, caso ambos os vidros e o tejadilho fossem planos, consideram-se, agora, as suas curvaturas para concluir quais as equações de alinhamento finais. Isto é, da lista apresentada no subcapítulo anterior (Subcapítulo 4.1.3), resta concluir a terceira parte da equação de alinhamento, referente ao valor da constante de curvatura entre o ponto de medição e o ponto de ajuste, tendo em consideração a curvatura do teto relativamente ao tejadilho. E o quarto ponto, referente ao valor da diferença de referencial do ponto de medição para o ponto de ajuste.

Para descobrir quais os valores das constantes de curvatura utilizam-se as funções analíticas que representam a curvatura do teto e do tejadilho. É importante não esquecer, que a inclinação do teto relativamente ao tejadilho afeta a componente vertical da constante, sendo necessário multiplicar a mesma pelo cosseno do valor do ângulo, como é possível verificar através da Figura 4-22.

Como se conhecem as constantes de curvatura dos pontos E, F, G e H (Expressão 56 a 59), apenas é necessário descobrir para os novos pontos  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $L_1$  e  $L_2$ . Através das funções de curvatura do teto e do tejadilho, concluem-se as seguintes constantes de curvatura, ao longo da largura do veículo (plano XOZ):

- Para o ponto K<sub>1</sub>:  $z_7(XK) - z_7(XI)$ ;
- Para o ponto K<sub>2</sub>:  $z_8(XK) - z_8(XI)$ ;
- Para o ponto L<sub>1</sub>:  $z_7(XL) - z_7(XJ)$ ;
- E, para o ponto L<sub>2</sub>:  $z_8(XL) - z_8(XJ)$ .

(103 a 106)

Ao longo do comprimento do veículo (Plano YOZ), são equivalentes a:

- Para o ponto K<sub>1</sub>:  $z_1(YK) - z_1(YI1)$ ;
- Para o ponto K<sub>2</sub>:  $z_1(YK) - z_1(YI2)$ ;
- Para o ponto L<sub>1</sub>:  $z_1(YL) - z_1(YJ1)$ ;
- E, para o ponto L<sub>2</sub>:  $z_1(YL) - z_1(YJ2)$ .

(107 a 110)

Conclui-se que os valores finais das novas constantes de curvatura dos pontos de medição para os pontos de ajuste, tendo em consideração as inclinações do teto panorâmico relativamente ao tejadilho, equivalem a:

- Para o ponto K<sub>1</sub>:  $[z_7(XK) - z_7(XI)] \times \cos(\alpha_1 - \theta) + [z_1(YK) - z_1(YI1)] \times \cos(\beta_1 - \gamma)$
- Para o ponto K<sub>2</sub>:  $[z_8(XK) - z_8(XI)] \times \cos(\alpha_2 - \theta) + [z_1(YK) - z_1(YI2)] \times \cos(\beta_2 - \gamma)$
- Para o ponto L<sub>1</sub>:  $[z_7(XL) - z_7(XJ)] \times \cos(\alpha_1 - \theta) + [z_1(YL) - z_1(YJ1)] \times \cos(\beta_1 - \gamma)$
- E, para o ponto L<sub>2</sub>:  $[z_8(XL) - z_8(XJ)] \times \cos(\alpha_2 - \theta) + [z_1(YL) - z_1(YJ2)] \times \cos(\beta_2 - \gamma)$

(111 a 114)

Resta, finalmente, a quarta parte das funções de alinhamento. Para descobrir o valor de acerto do referencial é necessário, mais uma vez, recorrer às funções de curvatura do teto e do tejadilho. Como já se conhecem os valores da diferença de referencial do ponto de medição para o ponto de ajuste para os pontos E, F, G e H (Equações 68 a 71), resta descobrir os valores para os pontos de ajuste K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub>.

Neste passo, é muito importante ter em atenção aos pontos de referência que foram optados para cada um dos pontos que não contém tejadilho nas proximidades. De relembrar que foi utilizado D<sub>1</sub> como referência para I<sub>1</sub>, A<sub>1</sub> para I<sub>2</sub>, C<sub>1</sub> para J<sub>1</sub> e B<sub>1</sub> para J<sub>2</sub>. Pela mesma ideologia utilizada nas equações 68, 69, 70 e 71, obtêm-se os seguintes valores das constantes ao longo do comprimento do veículo:

- Para o ponto K<sub>1</sub>:  $z_1(YK) - z_1(1390)$ ;
- Para o ponto K<sub>2</sub>:  $z_1(YK)$ ;
- Para o ponto L<sub>1</sub>:  $z_1(YL) - z_1(1390)$ ;
- E, para o ponto L<sub>2</sub>:  $z_1(YL)$ .

(115 a 118)

Os valores das constantes são exatamente equivalentes às constantes de curvatura já concluídas (equações 102, 103, 104 e 105), ao longo da largura do veículo.

Logo, os valores necessários de retirar à função para acertar do referencial dos pontos de medição para os pontos de ajuste são:

- Para o ponto K1:  $[z_1(YK) - z_1(1390)] + [z_7(XK) - z_7(XI)]$
- Para o ponto K2:  $z_1(YK) + [z_8(XK) - z_8(XI)]$  (119 a 122)
- Para o ponto L1:  $[z_1(YL) - z_1(1390)] + [z_7(XL) - z_7(XJ)]$
- E, para o ponto L2:  $z_1(YL) + [z_8(XL) - z_8(XJ)]$

Conhecidas as quatro partes das funções analíticas, concluem-se, finalmente, as equações finais de alinhamentos de ambos os vidros do teto panorâmico:

- $e = a - \left[\frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x\right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) + [y_{a1} - YA + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma) + [z_3(XE) - z_3(XA)] \times \cos(\alpha_1 - \theta) + [z_1(YE) - z_1(YA)] \times \cos(\beta_1 - \gamma) - [z_1(YE) + [z_3(XE) - z_3(XA)]]$
- $f = b + \left[\frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x\right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) + [y_{a1} - YB + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma) + [z_3(XF) - z_3(XB)] \times \cos(\alpha_1 - \theta) + [z_1(YF) - z_1(YB)] \times \cos(\beta_1 - \gamma) - [z_1(YF) + [z_3(XF) - z_3(XB)]]$
- $g = c + \left[\frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x\right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) - [YC - y_{a2} + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma) + [z_4(XG) - z_4(XC)] \times \cos(\alpha_1 - \theta) + [z_1(YG) - z_1(YC)] \times \cos(\beta_1 - \gamma) - [z_1(YG) - z_1(1350)] + [z_4(XG) - z_4(XC)]$
- $h = d - \left[\frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x\right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) - [YD - y_{a2} + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma) + [z_4(XH) - y_4(XD)] \times \cos(\alpha_1 - \theta) + [z_1(YH) - z_1(YD)] \times \cos(\beta_1 - \gamma) - [z_1(YH) - z_1(1350)] + [z_4(XH) - z_4(XD)]$
- $k_1 = i_1 - \left[\frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x\right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) + [y_{a3} - YI1 + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma) + [z_7(XK) - z_7(XI)] \times \cos(\alpha_1 - \theta) + [z_1(YK) - z_1(YI1)] \times \cos(\beta_1 - \gamma) - [z_1(YK) - z_1(1390)] + [z_7(XK) - z_7(XI)]$
- $k_2 = i_2 - \left[\frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x\right] \times \tan(\alpha_2 - \theta) - [YI2 - y_{a3} + \Delta y] \times \tan(\beta_2 - \gamma) + [z_8(XK) - z_8(XI)] \times \cos(\alpha_2 - \theta) + [z_1(YK) - z_1(YI2)] \times \cos(\beta_2 - \gamma) - [z_1(YK) + [z_8(XK) - z_8(XI)]]$

- $l_1 = j_1 + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_1 - \theta) + [y_{a3} - YJ1 + \Delta y] \times \tan(\beta_1 - \gamma) + [z_7(XL) - z_7(XJ)] \times \cos(\alpha_1 - \theta) + [z_1(YL) - z_1(YJ1)] \times \cos(\beta_1 - \gamma) - [[z_1(YL) - z_1(1390)] + [z_7(XL) - z_7(XJ)]]$
- $l_2 = j_2 + \left[ \frac{1}{2}(X - X_a) + \Delta x \right] \times \tan(\alpha_2 - \theta) - [YJ2 - y_{a3} + \Delta y] \times \tan(\beta_2 - \gamma) + [z_8(XL) - z_8(XJ)] \times \cos(\alpha_2 - \theta) + [z_1(YL) - z_1(YJ2)] \times \cos(\beta_2 - \gamma) - [z_1(YL) + [z_8(XL) - z_8(XJ)]]$

(123 a 130)

Onde:

- $\alpha_1 - \theta = \tan^{-1} \left[ \frac{[B_2 - z_3(X_B)] - [A_2 - z_3(X_A)]}{X_a} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{[B_1 - z_2(X_B)] - [A_1 - z_2(X_A)]}{X_a} \right]$
- $\alpha_2 - \theta = \tan^{-1} \left[ \frac{[D_2 - z_4(X_D)] - [C_2 - z_4(X_C)]}{X_a} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{[B_1 - z_2(X_B)] - [A_1 - z_2(X_A)]}{X_a} \right]$
- $\beta_1 - \gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{[I_1 - z_1(Y_{I1})] - [A_2 - z_1(Y_A)]}{Y_{a1}} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{[D_1 - z_1(1390)] - [A_1 - z_1(0)]}{1390} \right]$
- $\beta_2 - \gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{[D_2 - z_1(Y_D)] - [I_2 - z_1(Y_A)]}{Y_{a2}} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{[D_1 - z_1(1390)] - [A_1 - z_1(0)]}{1390} \right]$
- $a = A_2 - A_1$
- $b = B_2 - B_1$
- $c = C_2 - C_1$
- $d = D_2 - D_1$
- $i_1 = I_1 - D_1;$
- $i_2 = I_2 - A_1;$
- $j_1 = J_1 - C_1;$
- $j_2 = J_2 - B_1;$

(131 a 142)

## 4.2 Programação e verificação das equações de alinhamento obtidas

Ao longo do desenvolvimento das equações de alinhamento, no subcapítulo anterior (Subcapítulo 4.1) foram criados programas em *MATLAB*, para verificação das mesmas e para facilitar a escrita da linha de código do programa final. Foram desenvolvidos, no total, três programas. O primeiro foi escrito partindo pelas equações de alinhamento, considerando o teto panorâmico e o tejadilho do veículo planos. O segundo tem em conta a curvatura do teto e do tejadilho, através das funções de aproximação da curvatura do modelo tridimensional criado em *SolidWorks*. E o terceiro programa utiliza as equações finais de alinhamento, onde o teto é constituído por duas partes.



Encontra-se em anexo (Anexo B) o primeiro programa designado por “*alinhamento\_plano.m*”. De seguida, estão anexadas (Anexo C) todas as funções de aproximação por *splines* cúbicos da curvatura do teto e tejadilho, necessárias para o desenvolvimento do segundo programa. O mesmo encontra-se posteriormente anexado (Anexo D) e tem nome de “*alinhamento.m*”. As restantes funções de aproximação necessárias para o desenvolvimento do terceiro programa estão anexadas no Anexo E.

O último programa, que trata do problema real, tem o nome de “*ajuste.m*”, encontra-se também em anexo (Anexo F). Este programa não só indica qual o ajuste necessário para alinhar o teto panorâmico, mas também regista os valores medidos e os valores de ajuste numa base de dados, com o formato de documento de texto.

Todos os programas foram escritos de maneira a serem identificados como funções no *MATLAB* e os valores de entrada diferem de caso para caso. Para trabalhar com o primeiro programa, é necessário chamar a função *alinhamento\_plano*, com os seguintes valores de entrada:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , respetivamente. Para o segundo programa, chama-se a função *alinhamento* e ao introduzir os mesmos valores de entrada, pela mesma ordem, do primeiro programa. Finalmente, o terceiro programa corre ao chamar a função *ajuste* e ao inserir os seguintes valores de entrada: número de identificação do veículo,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $J_1$  e  $J_2$ ,  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , respetivamente.

Após a escrita de todas as linhas de código e assim que os programas ficaram operacionais, aproveitou-se o programa *SolidWorks* para verificar todas as equações de alinhamento obtidas no subtítulo anterior.

Para cada um dos três casos, foram criados modelos tridimensionais, das superfícies do teto e do tejadilho, e foi através dos mesmos que se retiraram os valores reais. Os três modelos estão representados nas três seguintes figuras (Figura 4-33, Figura 4-34 e Figura 4-35).

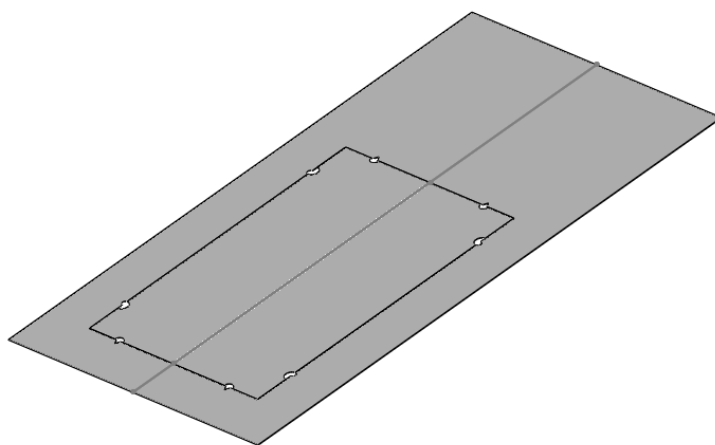


Figura 4-33: Modelo tridimensional da superfície do teto e tejadilho planos

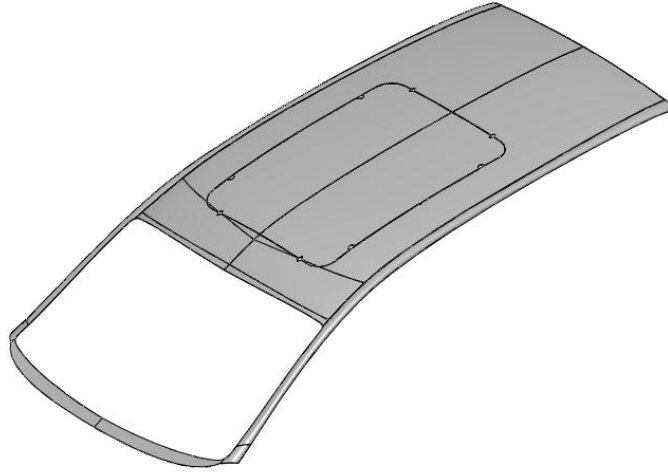


Figura 4-34: Modelo tridimensional da superfície do teto e tejadilho com curvatura

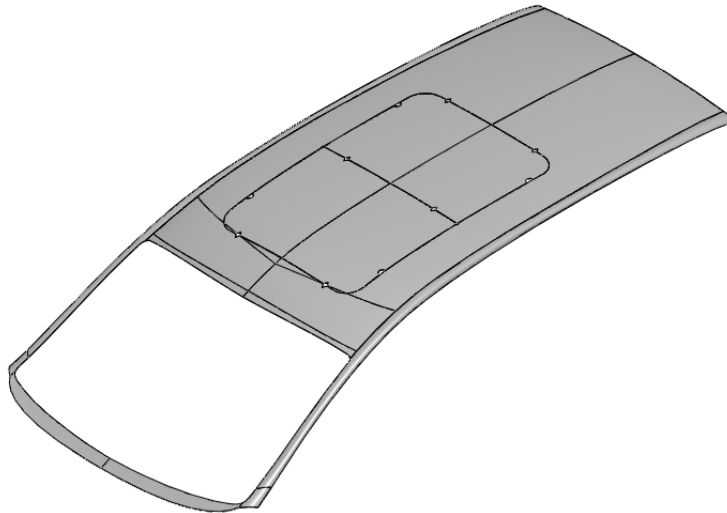


Figura 4-35: Modelo tridimensional da superfície do teto e tejadilho do veículo automóvel

Para cada um dos casos foram realizados três testes. No primeiro teste, introduziu-se uma inclinação do teto panorâmico relativamente ao tejadilho, em torno do eixo dos  $xx$ . Isto é, no primeiro teste, para os dois primeiros modelos,  $\alpha-\theta \in \mathbb{R}$  e  $\beta-\gamma=0$ . Para o último modelo, que cujo teto é constituído por dois vidros,  $\alpha_1-\theta \in \mathbb{R}$ ,  $\alpha_2-\theta \in \mathbb{R}$ ,  $\beta_1-\gamma=0$  e  $\beta_2-\gamma=0$ . Para aproximar o máximo possível do caso real, foram sempre utilizados valores de inclinações baixos.

No segundo teste, ao contrário do primeiro, apenas se introduziu inclinação em torno do eixo dos  $yy$ . Resultando então para os dois primeiros modelos:  $\alpha-\theta=0$  e  $\beta-\gamma \in \mathbb{R}$ . E para o terceiro modelo:  $\alpha_1-\theta=0$ ,  $\alpha_2-\theta=0$ ,  $\beta_1-\gamma \in \mathbb{R}$  e  $\beta_2-\gamma \in \mathbb{R}$ .

No último teste realizado, foram introduzidas inclinações em torno do eixo dos xx e do eixo dos yy, e assegurou-se que existia translação vertical do teto relativamente ao tejadilho.

De seguida, estão apresentadas as tabelas com todos os resultados obtidos e com os respetivos erros absolutos, relativamente aos valores de ajuste necessários de realizar. O erro absoluto foi calculado através da seguinte equação:

$$\text{Erro Absoluto} = |\text{Valor teórico} - \text{Valor prático}| \quad (143)$$

No caso em estudo, não foi considerado o erro relativo, visto que este considera a diferença do resultado final para o teórico, relativamente ao valor do ajuste. Isto é, se o ajuste for muito pequeno, independentemente de o resultado final estar muito perto do teórico, o erro relativo será elevado.

As tabelas seguintes (Tabela 4-12 a Tabela 4-20) são constituídas por quatro colunas. Na primeira foram introduzidos os valores das medições diretamente retiradas, nos pontos de medição, dos modelos tridimensionais, após a aplicação das inclinações do teto panorâmico. Na segunda, estão apresentados os valores das medições realizadas nos pontos de ajuste, dos modelos produzidos no *SolidWorks*. A terceira coluna, é constituída pelos resultados obtidos à saída dos programas, após serem introduzidos, como valores de entrada, as medições realizadas nos pontos de medição dos modelos tridimensionais (valores presentes na primeira coluna). Finalmente, na última coluna, estão escritos os valores dos erros absolutos. Da fórmula anteriormente escrita (Equação 142), os valores dos resultados obtidos nos programas correspondem aos valores práticos. Enquanto os valores diretamente medidos nos pontos de ajuste dos modelos virtuais, correspondem aos valores teóricos.

Para a realização das medições nos modelos tridimensionais, foi criado um plano horizontal com uma determinada distância entre o tejadilho e o devido teto, para simular as leituras dos comparadores no caso real.

As três tabelas seguintes (Tabela 4-12, Tabela 4-13 e a Tabela 4-14) correspondem aos três testes realizados às equações de alinhamento, quando considerados o teto panorâmico e tejadilho como planos. Logo, os resultados obtidos do programa, correspondem aos valores de saída do programa “*alinhamento\_plano.m*”.

No primeiro teste (Tabela 4-12) foi introduzida um ângulo de 1,050° como inclinação em torno do eixo dos yy ( $\alpha - \theta = 1,050^\circ$ ), e, como referido anteriormente, o valor de inclinação do teto em torno do eixo dos xx é nulo ( $\beta - \gamma = 0$ ).

Tabela 4-12: Resultados obtidos no primeiro teste realizado do primeiro modelo

<b>Distância aos pontos de medição (mm)</b>	<b>Valor dos ajustes a realizar (mm)</b>	<b>Resultados obtidos do programa (mm)</b>	<b>Erro absoluto (mm)</b>
A <sub>1</sub> = 97,00	E = -7,88	E = -7,88	0
A <sub>2</sub> = 91,87			
B <sub>1</sub> = 97,00	F = 7,88	F = 7,88	0
B <sub>2</sub> = 102,13			
C <sub>1</sub> = 97,00	G = 7,88	G = 7,88	0
C <sub>2</sub> = 102,13			
D <sub>1</sub> = 97,00	H = -7,88	H = -7,88	0
D <sub>2</sub> = 91,87			

De seguida, foi realizado o segundo teste (Tabela 4-13), onde foi introduzida uma inclinação em torno do eixo dos xx equivalente a  $0,277^\circ$  ( $\beta-\gamma = 0,277^\circ$ ) e o valor da inclinação em torno do eixo dos yy passa a ser nulo ( $\alpha-\theta=0$ ).

Tabela 4-13: Resultados obtidos no segundo teste realizado do primeiro modelo

<b>Distância aos pontos de medição (mm)</b>	<b>Valor dos ajustes a realizar (mm)</b>	<b>Resultados obtidos do programa (mm)</b>	<b>Erro absoluto (mm)</b>
A <sub>1</sub> = 97,00	E = 2,29	E = 2,29	0
A <sub>2</sub> = 100,16			
B <sub>1</sub> = 97,00	F = 2,29	F = 2,29	0
B <sub>2</sub> = 100,16			
C <sub>1</sub> = 97,00	G = -2,29	G = -2,29	0
C <sub>2</sub> = 93,84			
D <sub>1</sub> = 97,00	H = -2,29	H = -2,29	0
D <sub>2</sub> = 93,84			

Finalmente, no último teste realizado para o primeiro modelo (Tabela 4-14), foi introduzido um ângulo de inclinação em torno do eixo dos yy ( $\alpha$ - $\theta$ ) de  $-0.060^\circ$  e de  $0.095^\circ$  de inclinação em torno do eixo do xx ( $\beta$ - $\gamma$ ). Como referido, foi assegurada uma translação vertical do teto panorâmico relativamente ao tejadilho.

Tabela 4-14: Resultados obtidos no terceiro teste realizado do primeiro modelo

<b>Distância aos pontos de medição (mm)</b>	<b>Valor dos ajustes a realizar (mm)</b>	<b>Resultados obtidos do programa (mm)</b>	<b>Erro absoluto (mm)</b>
A <sub>1</sub> = 97,00	E = 1,90	E = 1,90	0
A <sub>2</sub> = 99,35			
B <sub>1</sub> = 97,00	F = 2,79	F = 2,79	0
B <sub>2</sub> = 99,93			
C <sub>1</sub> = 97,00	G = 1,23	G = 1,23	0
C <sub>2</sub> = 97,77			
D <sub>1</sub> = 97,00	H = 0,33	H = 0,33	0
D <sub>2</sub> = 97,19			

Passando para o segundo modelo, no primeiro teste (Tabela 4-15), foi considerada a inclinação em torno do eixo do xx ( $\beta$ - $\gamma$ ) nula. E a inclinação em torno do eixo do yy ( $\alpha$ - $\theta$ ) equivalente a  $-0,479^\circ$ .

Tabela 4-15: Resultados obtidos no primeiro teste realizado do segundo modelo

<b>Distância aos pontos de medição (mm)</b>	<b>Valor dos ajustes a realizar (mm)</b>	<b>Resultados obtidos do programa (mm)</b>	<b>Erro absoluto (mm)</b>
A <sub>1</sub> = 147,89	E = -3,56	E = -3,60	0,04
A <sub>2</sub> = 135,00			
B <sub>1</sub> = 147,89	F = 3,56	F = 3,60	0,04
B <sub>2</sub> = 139,69			
C <sub>1</sub> = 69,79	G = 3,60	G = 3,60	0
C <sub>2</sub> = 71,26			
D <sub>1</sub> = 69,80	H = -3,60	H = -3,60	0
D <sub>2</sub> = 66,57			

No segundo teste (Tabela 4-16), foi introduzida uma inclinação de  $-0,132^\circ$  em torno do eixo dos xx ( $\beta$ - $\gamma$ ), e nula para o eixo dos yy ( $\alpha$ - $\theta$ ).

Tabela 4-16: Resultados obtidos no segundo teste realizado do segundo modelo

<b>Distância aos pontos de medição (mm)</b>	<b>Valor dos ajustes a realizar (mm)</b>	<b>Resultados obtidos do programa (mm)</b>	<b>Erro absoluto (mm)</b>
A <sub>1</sub> = 147,89	E = -6,13	E = -6,23	0,10
A <sub>2</sub> = 130,70			
B <sub>1</sub> = 147,89	F = -6,13	F = -6,23	0,10
B <sub>2</sub> = 130,70			
C <sub>1</sub> = 69,80	G = -4,04	G = -4,04	0
C <sub>2</sub> = 65,29			
D <sub>1</sub> = 69,80	H = -4,04	H = -4,04	0
D <sub>2</sub> = 65,29			

No último teste (Tabela 4-17), tal como foi realizado no modelo anterior, foi assegurada a translação do teto, adicionada uma inclinação em torno do eixo dos yy ( $\alpha$ - $\theta$ ), com o valor de  $-0,0795^\circ$ , e em torno do eixo dos xx ( $\beta$ - $\gamma$ ), com o valor de  $0,0794^\circ$ .

Tabela 4-17: Resultados obtidos no terceiro teste realizado do segundo modelo

<b>Distância aos pontos de medição (mm)</b>	<b>Valor dos ajustes a realizar (mm)</b>	<b>Resultados obtidos do programa (mm)</b>	<b>Erro absoluto (mm)</b>
A <sub>1</sub> = 147,89	E = -0,03	E = -0,04	0,01
A <sub>2</sub> = 137,76			
B <sub>1</sub> = 147,89	F = 1,15	F = 1,15	0
B <sub>2</sub> = 138,54			
C <sub>1</sub> = 69,80	G = -0,17	G = -0,16	0,01
C <sub>2</sub> = 68,29			
D <sub>1</sub> = 69,80	H = -1,36	H = -1,36	0
D <sub>2</sub> = 67,52			

Finalmente, foram realizados os três testes para o último modelo. No primeiro teste (Tabela 4-18) foi introduzida uma inclinação equivalente a  $-0,416^\circ$ , para o vidro frontal do teto panorâmico, em torno do eixo dos yy ( $\alpha_1 - \theta = -0,416^\circ$ ). Para o vidro traseiro, uma inclinação de  $0,349^\circ$  ( $\alpha_2 - \theta = 0,349^\circ$ ). Ambos os vidros tinham inclinação nula, em torno do eixo dos xx ( $\beta_1 - \gamma = 0$  e  $\beta_2 - \gamma = 0$ ).

Tabela 4-18: Resultados obtidos no primeiro teste realizado do terceiro modelo

<b>Distância aos pontos de medição (mm)</b>	<b>Valor dos ajustes a realizar (mm)</b>	<b>Resultados obtidos do programa (mm)</b>	<b>Erro absoluto (mm)</b>
$A_1 = 141,71$	$E = -3,12$	$E = -3,12$	0
$A_2 = 129,13$			
$B_1 = 141,71$	$F = 3,12$	$F = 3,22$	0,1
$B_2 = 133,20$			
$C_1 = 63,62$	$G = -2,62$	$G = -2,62$	0
$C_2 = 61,03$			
$D_1 = 63,62$	$H = 2,62$	$H = 2,62$	0
$D_2 = 64,44$			
$I_1 = 62,16$	$K_1 = -3,13$	$K_1 = -3,13$	0
$I_2 = 64,83$	$K_2 = 2,62$	$K_2 = 2,62$	0
$J_1 = 66,23$	$L_1 = 3,13$	$L_1 = 3,13$	0
$J_2 = 61,42$	$L_2 = -2,62$	$L_2 = -2,62$	0

Para o segundo teste (Tabela 4-19), as inclinações de ambos os vidros em torno do eixo dos yy, passaram a ser nulas, e foram introduzidas inclinações em torno do eixo dos yy ( $\alpha_1 - \theta = 0^\circ$  e  $\alpha_2 - \theta = 0^\circ$ ). O vidro frontal do teto panorâmico foi inclinado  $0,541^\circ$  em torno do eixo dos xx ( $\beta_1 - \gamma = 0,567^\circ$ ), em relação ao tejadilho do veículo. E, o vidro traseiro ficou com uma inclinação equivalente a  $-0,423^\circ$  ( $\beta_2 - \gamma = -0,608^\circ$ ).

Tabela 4-19: Resultados obtidos no segundo teste realizado do terceiro modelo

<b>Distância aos pontos de medição (mm)</b>	<b>Valor dos ajustes a realizar (mm)</b>	<b>Resultados obtidos do programa (mm)</b>	<b>Erro absoluto (mm)</b>
A <sub>1</sub> = 141,71	E = -0,74	E = -0.71	0,03
A <sub>2</sub> = 132,23			
B <sub>1</sub> = 141,71	F = -0,74	F = -0.71	0,03
B <sub>2</sub> = 132,23			
C <sub>1</sub> = 63,62	G = -1,10	G = -1,10	0
C <sub>2</sub> = 63,54			
D <sub>1</sub> = 63,62	H = -1,10	H = -1,10	0
D <sub>2</sub> = 63,54			
I <sub>1</sub> = 58,73	K <sub>1</sub> = -5,66	K <sub>1</sub> = -5,65	0
I <sub>2</sub> = 57,46	K <sub>2</sub> = -5,88	K <sub>2</sub> = -5,88	0
J <sub>1</sub> = 58,73	L <sub>1</sub> = -5,66	L <sub>1</sub> = -5,66	0
J <sub>2</sub> = 57,46	L <sub>2</sub> = -5,88	L <sub>2</sub> = -5,88	0

No último teste realizado (Tabela 4-20), foram introduzidas inclinações em torno do eixo dos xx e dos yy, como também foi assegurada uma translação vertical de ambos os vidros do teto panorâmico. Em torno do eixo dos yy foi adicionado uma inclinação de 0,055° e de 0,153°, ao vidro frontal ( $\alpha_1-\theta$ ) e ao vidro traseiro ( $\alpha_2-\theta$ ), respetivamente. O vidro frontal e o vidro traseiro foram ainda inclinados -0,035° e 0,034°, em torno do eixo dos xx ( $\beta_1-\gamma$  e  $\beta_2-\gamma$ ), respetivamente.

Tabela 4-20: Resultados obtidos no terceiro teste realizado do terceiro modelo

<b>Distância aos pontos de medição (mm)</b>	<b>Valor dos ajustes a realizar (mm)</b>	<b>Resultados obtidos do programa (mm)</b>	<b>Erro absoluto (mm)</b>
A <sub>1</sub> = 141,71	E = 2,09	E = 2,14	0,05
A <sub>2</sub> = 133,63			
B <sub>1</sub> = 141,71	F = 1,28	F = 1,31	0,03



$B_2 = 133,10$			
$C_1 = 63,62$	$G = -4,66$	$G = -4,64$	0,02
$C_2 = 57,90$			
$D_1 = 63,62$	$H = -5,18$	$H = -5,15$	0,03
$D_2 = 57,56$			
$I_1 = 64,90$	$K_1 = 0,80$	$K_1 = 0,80$	0
$I_2 = 58,32$	$K_2 = -4,88$	$K_2 = -4,88$	0
$J_1 = 64,36$	$L_1 = -0,02$	$L_1 = -0,02$	0
$J_2 = 58,65$	$L_2 = -4,37$	$L_2 = -4,37$	0

#### 4.2.1 Análise dos resultados obtidos

Analisando os resultados obtidos, retiram-se muitas conclusões a partir dos erros absolutos. À partida, conclui-se que os resultados obtidos do primeiro modelo tridimensional diferem bastante dos outros modelos, uma vez que todos os valores dos erros absolutos são nulos.

Todas as equações de equilíbrio resultam apenas de deduções geométricas e trigonométricas. Porém, as equações das curvaturas do tejadilho e do teto panorâmico utilizadas resultam da aproximação por *splines* cúbicos da superfície real. Por consequência, é muito difícil garantir erros absolutos nulos para o segundo e terceiro modelos tridimensionais, que recorrem às tais aproximações.

No caso do primeiro modelo tridimensional, tanto o teto panorâmico como o tejadilho do veículo foram considerados como planos, para simplificar o problema real. Não considerando as suas curvaturas, não existe a obrigação de utilizar funções interpoladoras, anulando a necessidade de utilização de valores aproximados nas equações de alinhamento. Garantindo, então, resultados perfeitos, com erro absoluto nulo.

Por outro lado, comparando os resultados dos erros obtidos nos pontos de ajuste E e F, com os restantes pontos, conclui-se que são bastante superiores. Isto deve-se ao fato destes pontos de ajuste dependerem de pontos de medição onde a inclinação da curvatura do tejadilho e do teto é mais acentuada. Como foi admitido aproximadamente o mesmo espaçamento entre pontos na interpolação por *splines* cúbicos, e o fato dos valores das curvaturas irem variando entre pontos, resulta um maior erro de aproximação. Como a curvatura do tejadilho e do teto é maioritariamente reduzida, nas zonas com maior inclinação

existe um maior desvio dos valores reais. Daí, o erro absoluto ser superior nos pontos de ajuste E e F, relativamente aos restantes.

Para corrigir este erro, basta aumentar o número de pontos retirados diretamente dos modelos tridimensionais, para as funções de aproximação, nas zonas de maior inclinação da curvatura.

Mesmo tendo em conta os maiores erros absolutos, obtiveram-se bons resultados, com muita precisão e todos dentro da expectativa. Tendo em conta que o operário tem a capacidade de realizar ajustes até aproximadamente 0,5 mm e o maior valor de erro obtido (equivalente a 0,1 mm), conclui-se que foram obtidos bons resultados e ainda podem ser melhorados.

## **Desenvolvimento do suporte de comparadores**

Neste capítulo, é apresentado todo o seguimento lógico por de trás do desenvolvimento do suporte de comparadores, tal como são explicadas todas as decisões tomadas relativas ao sistema que desloca verticalmente o suporte.

Durante todo o desenvolvimento do suporte, tiveram-se em consideração as cotas definidas na elaboração das equações e programas de alinhamento, mais especificamente, as distâncias entre sensores. Isto porque as funções dependem das cotas já definidas e, caso seja necessário alterar estas cotas, é necessário criar novas funções de aproximação da curvatura e, por sua vez, alterar a linha de código dos programas.

### **5.1 Escolha do sistema de deslocamento vertical do suporte de comparadores**

Numa primeira fase é essencial escolher o sistema mais adequado para deslocar verticalmente o suporte. Para tal, existem três tipos de sistemas possíveis de serem utilizados neste, [14]:

- Sistema de acionamento por parafuso e porca;
- Sistema de acionamento pneumático ou hidráulico;
- Sistema de transmissão por corrente.
- Sistema de acionamento por atuador linear elétrico

Nos seguintes subcapítulos estão descritos os princípios de funcionamento de cada um dos sistemas.

#### **5.1.1 Sistema de acionamento por veio roscado**

Neste sistema, é introduzida uma rotação axial num veio roscado montado verticalmente, recorrendo a um motor elétrico. Dependendo do sentido de rotação do veio, o suporte de comparadores sobe ou desce, uma vez que se encontra ligado ao veio, por uma rosca fêmea. Para que o suporte se encontre sempre nivelado, é necessário adicionar guias nas suas extremidades.

### **5.1.2 Sistema de acionamento pneumático ou hidráulico**

Recorrendo a um sistema composto por uma bomba de compressão, tubulações e atuadores, utiliza-se a pressurização de um fluido, para levantar e descer o suporte. Fixando o sistema no teto da estação de trabalho, seria necessária uma pressão negativa para subir o suporte e uma positiva, ou menos pressão negativa, para o descer. Logo é necessário um atuador de dupla ação. Trata-se de um sistema simples, eficaz e fácil de instalar.

Existem diferenças entre um sistema pneumático e o sistema hidráulico. A mais evidente é o tipo de fluido que é utilizado. No caso do sistema pneumático é utilizado ar e no hidráulico é, geralmente, utilizado óleo.

### **5.1.3 Sistema de transmissão por corrente**

Neste sistema é introduzida uma rotação axial a um veio de transmissão montado horizontalmente, recorrendo a um motor elétrico. Nas extremidades do veio estão ligadas duas correntes. Dependendo do sentido de rotação das correntes, o suporte, preso a um ponto de cada corrente, desloca-se verticalmente para cima ou para baixo.

### **5.1.4 Sistema de acionamento por atuador linear elétrico**

Este sistema é muito semelhante ao sistema por acionamento hidráulico ou pneumático, sendo que apenas difere no tipo de atuador que utiliza. Enquanto o sistema hidráulico ou pneumático utiliza a compressão de um fluido para mover a sua haste, este atuador converte energia elétrica em movimento mecânico. Utiliza um motor elétrico e um sistema de engrenagens para deslocar verticalmente a haste.

### **5.1.5 Comparação dos sistemas e escolha do mais adequado**

Neste subcapítulo, são avaliadas todas as vantagens e desvantagens dos sistemas mencionados, para proceder com a escolha do mais adequado para o projeto.

Embora seja muito preciso e eficaz, o sistema de acionamento por veio roscado, necessita de constantes lubrificações do veio. Seria então necessário adicionar ao sistema, um sistema autónomo de lubrificação, que necessitaria de eventuais manutenções. Por outro lado, existe um grande desgaste do veio roscado, tal como da rosca fêmea, sendo essencial efetuar substituições dos mesmos componentes. Trata-se então de um sistema eficaz, mas que traz grandes custos a longo prazo.

Embora o sistema de transmissão por corrente não sofre de desgaste de componentes, também necessita de constantes lubrificações da corrente. Sendo o valor do custo a longo prazo mais baixo relativamente ao sistema por veio roscado. Por outro lado, as correntes deste sistema necessitam de folgas o que traz problemas no posicionamento vertical da mesa.

Tal como o sistema por acionamento por parafuso roscado, o acionamento por motor elétrico também sofre bastante de desgaste das rodas dentadas que constituem o redutor. Ao contrário dos atuadores pneumáticos e hidráulicos, este atuador necessita de ser substituído inúmeras vezes devido ao seu desgaste mecânico, o que implica um aumento dos custos a longo prazo.

Os sistemas pneumáticos e hidráulicos, que são muito utilizados na indústria de produção devido à sua eficácia e eficiência, tem a desvantagem de necessitar de espaço para a bomba de compressão. Porém, a sua instalação é simplificada, e a inexistência da necessidade de constantes lubrificações e manutenções, têm por consequência, uma redução dos custos. Prevê-se, então, que se tratam de sistemas mais adequados do que os anteriormente apresentados. Resta agora, comparar o sistema hidráulico ao sistema pneumático.

Como o sistema hidráulico utiliza um fluido incompressível, tem a vantagem de ter uma elevada precisão no posicionamento da haste, como é capaz de realizar esforços muito superiores ao sistema pneumático. Porém, neste caso, é apenas relevante a posição final da haste e que o deslocamento da mesma não seja realizado de forma brusca. Por outro lado, não é necessário que o sistema realize grandes esforços, visto apenas ser necessário que o mesmo realize forças superiores ao peso do suporte de comparadores. As forças de avanço da haste nos sistemas hidráulicos podem ser tão elevadas que poderiam facilmente deformar a estrutura, caso seja usado um batente para garantir o posicionamento da mesma.

Existe ainda uma vantagem de utilizar o sistema pneumático, neste caso em específico, porque as instalações da empresa, já têm um sistema de pressão pneumática instalado. Anulando a necessidade da adição de uma bomba de compressão de ar na estação de trabalho.

Conclui-se que o sistema de acionamento pneumático, com um atuador de dupla ação com amortecimento, é o mais adequado para deslocar verticalmente, de forma suave, o suporte de comparadores.

## **5.2 Desenho do suporte de comparadores**

Neste subcapítulo é apresentado o desenvolvimento do suporte, tal como a escolha dos seus componentes, e quais os seguimentos lógicos por de trás das decisões tomadas.

### **5.2.1 Escolhas do material e do perfil da estrutura do suporte**

Para reduzir os custos de produção e simplificar o projeto, optou-se por utilizar tubos estruturais de aço laminados a quente, com secção quadrada. Escolheu-se, para material do suporte aço laminado a quente, visto ser um metal de baixo custo, resistente e pelo fato do seu peso não ser muito relevante, porque a estrutura não tem um volume muito grande e, por sua vez, uma massa elevada. O fato de ser de aço e ter um perfil quadrado simplifica o projeto visto facilitar eventuais soldaduras, que terão de ser realizadas na conceção do suporte. Por outro lado, optou-se por uma laminação a quente, visto ser menos dispendioso e pelo fato de não ser necessário um metal muito resistente e com melhores acabamentos. Isto porque, apenas são assegurados ao suporte grande, os suportes individuais de cada comparador.

Por outro lado, é essencial garantir que a largura do perfil quadrangular do tubo não ultrapasse o valor assumido para as distâncias entre os comparadores que medirão a cota do tejadilho dos que medirão a cota do teto panorâmico (40 mm).

Assim, partindo pelo catálogo do fornecedor “Chagas” [15], recorre-se à tabela dos tubos estruturais laminados a quente, presente em anexo (Anexo G), e optou-se por utilizar o perfil mais adequado para o projeto. Neste caso, é o perfil mais pequeno e com menor espessura, visto que o suporte não será submetido a grandes esforços e tenciona-se reduzir custos de produção (largura equivalente a 25 mm e espessura a 2 mm). Sabe-se que o perfil segue a norma europeia: EN 10210-1 e é composto de aço: S355 J2 H.

Como referido anteriormente, os comparadores não são fixados diretamente no suporte de comparadores, mas sim, por uma peça posteriormente apresentada.

Resta, agora, escolher os comparadores a utilizar para que seja possível dimensionar as suas peças de suporte.

### **5.2.2 Escolha dos comparadores**

Tendo em conta tudo o que foi referido no subcapítulo 2.1.1 (Instrumentos de medição), é necessário escolher um comparador capaz de converter os valores medidos analiticamente, para valores digitais, para facilitar o processamento de dados. Para tal, recorreu-se ao catálogo de comparadores do fornecedor “Mitutoyo”, [16], e escolheu-se um comparador digital, capaz de cumprir os requisitos funcionais, retirado da tabela que se encontra em anexo (Anexo H).

O comparador escolhido tem um alcance máximo de 25,4 mm, por isso é necessário desenhar o suporte de comparadores tendo em conta a curvatura do tejadilho e do teto panorâmico e o devido alcance. Não se escolheu um comparador com maior alcance, visto que o máximo existente no catálogo da “Mitutoyo” é equivalente a 50,8 mm, e a diferença do ponto de cota máxima para o ponto de cota

mínima da curvatura do tejadilho é igual a 78,977 mm. Significa isto, que o suporte nunca poderia ser plano e ter todas os pontos de afiação dos comparadores à mesma cota. Assim, para redução de custos, optou-se por escolher um comparador com menor alcance, uma vez que seria sempre necessário que o suporte fosse concebido tendo em conta a curvatura do tejadilho e do teto panorâmico.

Também não se escolheu um comparador com menor alcance, visto que os comparadores com alcance de medição inferior ao escolhido têm 12,7 mm de alcance. Isto poderia trazer problemas, visto que a diferença de cota dos pontos de medição A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub>, e B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>, equivale a 10,547 mm.

Na próxima figura (Figura 5-1), retirada do catálogo da “Mitutoyo”, está representado um desenho técnico do comparador, com as respetivas cotas.

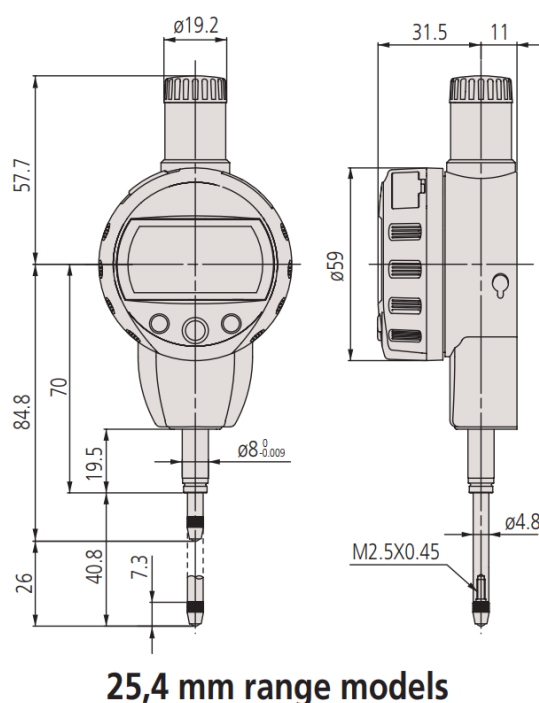


Figura 5-1: Comparador escolhido

### 5.2.3 Conceção do suporte de comparadores

Como foi referido anteriormente, é necessário ter em consideração a curvatura do tejadilho e do alcance de leitura dos comparadores escolhidos, para garantir que todos os comparadores entram em contacto com a superfície desejada. Uma vez que os mesmos têm 25,4 mm de alcance de leitura, admite-se uma cota para a posição de leitura do suporte (quando este se deslocar para o seu ponto de cota mínima), aproximadamente equivalente a 10 mm acima dos pontos de medição de cota mínima da curvatura do veículo. Assim se garante que todos os comparadores entram em contacto com a superfície e realizam as medições necessárias.

De maneira a que seja possível aproveitar este sistema noutros modelos que poderão vir a passar pela estação de trabalho, a estrutura do suporte foi desenvolvida por partes que respeitam as devidas dimensões do veículo, tal como as variáveis definidas nos programas. Como este projeto é referente à instalação do teto panorâmico em veículos de um determinado modelo, as partes da estrutura foram desenhadas respeitando as dimensões do mesmo.

Comparando a diferença de cotas dos pontos  $C_2$  e  $D_2$  para os restantes pontos de medição, conclui-se que o suporte tem de ser constituído por partes com cotas diferentes. A primeira parte a ser montada na estrutura, tem uma cota inferior e inclui os pontos de medição  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$ . Os pontos  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $J_1$  e  $J_2$ , serão medidos por comparadores que serão instalados na segunda parte adicional à estrutura, que tem uma cota superior. Finalmente, será montado uma última parte adicional, com a mesma cota que a segunda parte, onde serão instalados os restantes comparadores que medirão  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$  e  $D_2$ . Na primeira parte a diferença dos pontos de medição de maior cota dos de menor cota é equivalente a 10,547 mm e, na segunda e terceira parte, que estão à mesma cota, existe uma diferença de 1,456 mm.

Resta agora saber qual o valor da diferença de cotas entre a primeira parte adicional, da segunda e terceira. Para tal, partindo pelo modelo tridimensional da superfície do teto e do tejadilho, concluiu-se que a diferença entre o ponto de cota máxima da curvatura do tejadilho e do teto, para o ponto de cota mínima, corresponde a 78.977 mm. Logo, tendo o valor obtido, utilizou-se um valor exato, para simplificar o dimensionamento, de 80 mm.

Para garantir o bom funcionamento do último programa concebido para o alinhamento do teto panorâmico, tem de se ter em consideração a diferença de cotas dos sensores presentes na primeira parte da estrutura, relativamente à segunda e terceira. Para tal, basta adicionar aos valores medidos pelos comparadores presentes na segunda e terceira parte ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $J_1$  e  $J_2$ ), 80 mm.

Para evitar que os comparadores se danifiquem, em caso de embate lateral com a estrutura, no decorrer do processo medição, não foram instalados quaisquer comparadores nos veios que delimitam a extremidade do suporte.

Como a conceção da estrutura parte de soldaduras, dificilmente se consegue garantir o perfeito dimensionamento de todas as cotas nominais e tolerâncias. Assim, foram adicionadas folgas, ao longo da largura e do comprimento da estrutura, às partes adicionais onde são instaladas as peças que asseguram os comparadores, de 4 mm e 2mm, respetivamente, possibilitando eventuais ajustes.

De maneira a garantir que a estrutura se desloca devidamente na vertical, optou-se por utilizar guias nas extremidades da estrutura. Recorreu-se ao catálogo de guiamento simples e económico de baixo atrito da “Rexroth”, [17], e escolheram-se guias *Rexroth R1027 230 44*, cujas características estão presentes em anexo (Anexo I). Na seguinte figura (Figura 5-2) está apresentada a guia que será utilizada:





Figura 5-2: Guia Rexroth R1027 230 44, [17]

Uma vez escolhidas as guias, adicionaram-se os veios correspondentes às dimensões definidas no catálogo (30 mm de diâmetro).

Partindo pelo que foi referido, foi concebido um modelo tridimensional em *SolidWorks* do suporte de comparadores. Na seguinte figura (Figura 5-3) está representada a estrutura sem as partes adicionadas montadas.

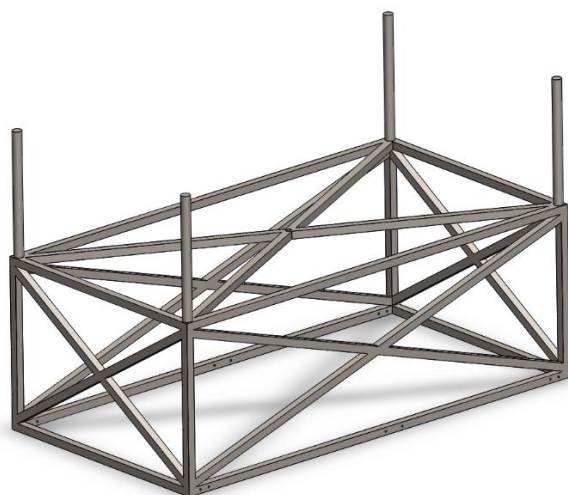


Figura 5-3: Estrutura do suporte sem partes adicionais

Para a fixação das três partes adicionais, foram utilizadas chapas de aço com 2 mm de espessura e parafusos com devidas porcas M6. Na seguinte figura (Figura 5-4) está representada a estrutura final após a montagem das partes adicionais. A partir do livro de Desenho Técnico, [18], concluiu-se que todos os furos passantes teriam um diâmetro de 6,6 mm, respeitando uma série média H13.

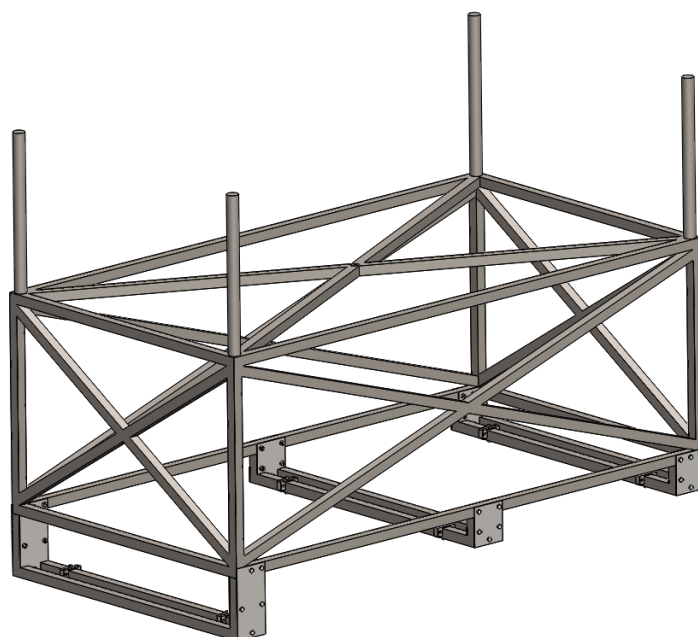


Figura 5-4: Estrutura do suporte com partes adicionais

#### 5.2.4 Desenvolvimento da peça de suporte dos comparadores

Todos os comparadores são fixados à estrutura suporte por peças. Cada peça suportará dois comparadores com a distância, já assumida no desenvolvimento dos programas de alinhamento do teto panorâmico, de 40 mm.

A peça tira vantagem do fato do perfil dos tubos estruturais serem quadrados, uma vez que os comparadores se encontram a 20 mm do centro do tubo. Podendo existir um momento criado pelo peso dos comparadores, ou das forças exercidas nos mesmos durante a sua montagem.

Para fixar os comparadores à peça foram utilizados parafusos M6. Para a fixação da própria peça à estrutura também foram utilizados parafusos M6, porém o aperto é realizado na devida porca sextavada. O furo passante da peça respeita uma série média H13, isto é, tem 6.6 mm de diâmetro, [18].

Para facilitar e reduzir os custos de fabrico, admitiu-se que a peça resulta da maquinação, por torno em CNC, de um bruto de alumínio 2024-T6, com 20 mm de largura, 60 mm de comprimento e 30 mm de altura. Como a operação é realizada por torno, considera-se um acabamento superficial N9, [19].

Em anexo (Anexo L) está presente o desenho técnico da peça, respeitando a norma portuguesa NP-265, para peças metálicas trabalhadas por arranque de apara, com cotas não toleranciadas.

Uma vez que foram adicionadas folgas às cotas dos furos passantes da estrutura, para possibilitar eventuais ajustes no posicionamento das peças, foram consideradas folgas com as mesmas cotas nas peças (neste caso, de 2 mm) entre as superfícies maquinadas, com o mesmo objetivo.

Na próxima figura (Figura 5-5) está representado o modelo tridimensional, em *SolidWorks*, da peça, respeitando todos os parâmetros referidos anteriormente.

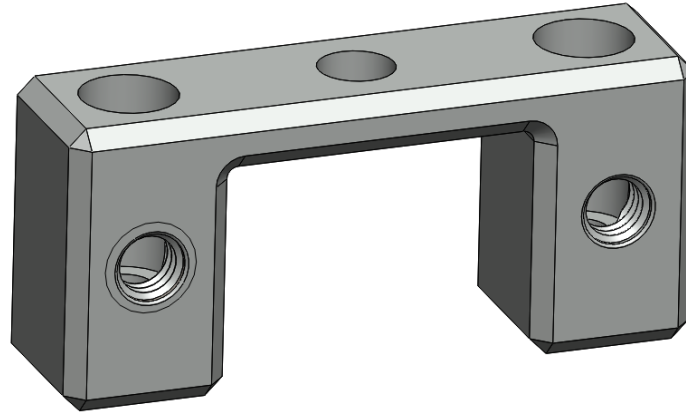


Figura 5-5: Modelo tridimensional da peça de suporte de comparadores

### 5.2.5 Escolha dos atuadores pneumáticos

Para que seja possível deslocar verticalmente o suporte de comparadores, os atuadores pneumáticos têm de realizar uma força superior ao peso do suporte de comparadores.

Aproveitando os modelos tridimensionais concebidos no programa *SolidWorks*, é possível, através do mesmo, conhecer os valores das massas da estrutura e das peças.

Despreza-se a energia necessária para colocar o suporte em movimento, visto não ser necessário que este atinja velocidade elevadas durante o seu deslocamento vertical. Sabe-se que o Peso ( $P$ ) da estrutura é calculado através da multiplicação da massa ( $m$ ) pela aceleração gravítica ( $g$ ):

$$P = m \times g \quad (144)$$

Após definir todos os materiais aos modelos tridimensionais desenvolvidos no programa *SolidWorks*, foi concluído o valor da massa total do suporte de comparadores. O valor da mesma equivale a 48,846 Kg, que é arredondado por excesso para 50 Kg.

Logo, partindo pela expressão 143, o peso da estrutura ( $P_{\text{estrutura}}$ ) é equivalente a:

$$P_{\text{estrutura}} = 50 \times 9,81 = 490,5 \text{ N}$$

Porém, como o sistema estará a trabalhar numa estação de trabalho, onde existe a possibilidade de existirem erros humanos e eventuais acidentes de trabalho, o atuador tem de estar preparado para aguentar esforços e forças de impacto submetidos na estrutura. Admite-se, então, que o atuador tem de

suportar forças adicionais equivalente ao peso provocado por um corpo com 100 Kg. Respeitando a expressão 143, conclui-se que o peso adicional ( $P_{\text{adicional}}$ ) é equivalente a:

$$P_{\text{adicional}} = 100 \times 9,81 = 981 \text{ N}$$

Assim, o atuador tem de estar preparado para exercer uma força total ( $F_{\text{total}}$ ) equivalente a:

$$F_{\text{total}} = 490,5 + 981 = 1471,5 \text{ N}$$

Conhecido o valor da força total que o sistema pneumático tem de realizar, recorreu-se ao catálogo de atuadores pneumáticos da empresa “Parker”, [19], e optou-se por utilizar o modelo P1E-G063MA2-0200. Este atuador de dupla ação tem 63 mm de diâmetro e tem um amortecedor para suavizar o deslocamento vertical do suporte de comparadores. O atuador é montado a partir de uma flange traseira e tem, ainda, um curso da haste de 200 mm, suficiente para garantir que o veículo não embata na estrutura quando a haste estiver recolhida.

Este atuador é capaz de realizar forças até 1870,35 N no avanço da haste e 1681,85 N no retorno, a uma pressão equivalente a 6 bar, suficiente para deslocar o suporte verticalmente. Em anexo (Anexo J) encontram-se todas as suas características.

### 5.2.6 Desenvolvimento do quadro superior

Este quadro não só garante uma instalação adequada do suporte na estação de trabalho, como é nele que será montado tanto o atuador, como os batentes que asseguram o posicionamento do suporte durante a medição. Foi considerada para toda a estrutura do quadro superior o mesmo perfil tubular quadrado, laminado a quente, com 25 mm de largura e 2 mm de espessura.

De maneira a garantir uma boa fixação no teto da estação de trabalho, optou-se por utilizar parafusos M10. É necessária uma boa fixação, visto que será no quadro superior que será instalado o atuador pneumático, tal como os batentes que asseguram o posicionamento do suporte de comparadores. Considerou-se para os furos passantes dos parafusos M10, uma série média H13, resultando um furo com 11 mm de diâmetro, [18].

Os batentes são montados na estrutura do quadro por aperto de parafusos M6 e devidas porcas, com o auxílio de chapas de aço, com furos passantes de 6,6 mm. Optou-se por esta solução, para possibilitar a troca dos mesmos caso a empresa tencione utilizar o suporte para o alinhamento do teto panorâmico de outro modelo futuro.

Tal como foram adicionadas folgas nas partes adicionais da estrutura para possibilitar eventuais ajustes durante a montagem das peças que asseguram os comparadores, considera-se uma folga vertical de 3mm nos batentes, com o mesmo intuito.

Uma vez que os veios das guias foram instalados no suporte de comparadores, as próprias guias têm de ser fixadas ao quadro superior. Para tal, foram desenvolvidas peças que respeitam, não só as cotas do tubo estrutural do quadro, como todas as dimensões das guias escolhidas. Estas peças, também elas, resultantes da maquinação, por torno em CNC, de um bloco de alumínio 2024-T6, são fixadas tanto à estrutura do quadro, como às guias do suporte. Como a operação é realizado por torno, considera-se um acabamento superficial N9, [19].

Em anexo (Anexo L) está presente o desenho técnico da peça de fixação das guias, respeitando a norma portuguesa NP-265, para peças metálicas trabalhadas por arranque de apara, com cotas não toleranciadas.

A fixação da peça à estrutura é realizada por aperto de um parafuso M6 e devida porca. Quanto às guias, respeitaram-se as suas cotas já definidas pelo fornecedor e utilizaram-se parafusos M8 com uma rosca com 20,850 mm de comprimento. Todos os furos passantes da peça respeitam uma série média H13. Isto é, os furos passantes M6, têm 6,6 mm de diâmetro, e os furos M8, têm 9 mm, [18].

Na figura seguinte (Figura 5-6) está representado o modelo tridimensional, desenvolvido em *SolidWorks*, da peça que vai fixar as guias ao quadro superior.

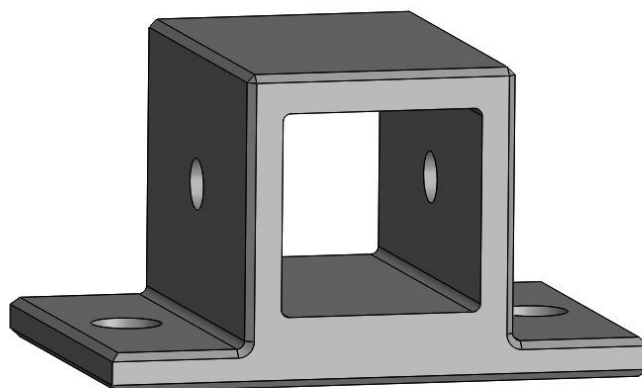


Figura 5-6: Modelo tridimensional da peça de suporte das guias

Tendo em conta tudo o que foi referido anteriormente, foi concebido um modelo tridimensional em *SolidWorks*, do quadro superior. O mesmo está representado na figura seguinte (Figura 5-7).

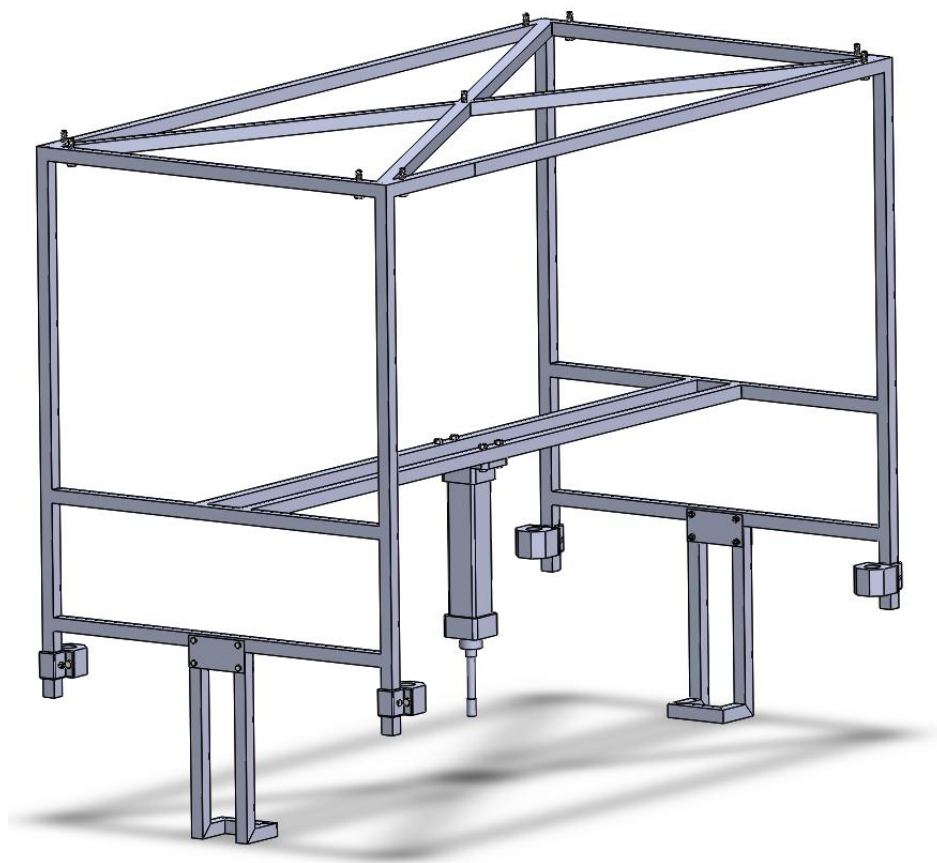


Figura 5-7: Modelo tridimensional do quadro superior do suporte de comparadores

Com os modelos do quadro superior e da estrutura do suporte, foi finalmente possível realizar um *assembly*<sup>4</sup> em *SolidWorks* do resultado de todo o desenvolvimento do suporte de comparadores. Na figura seguinte (Figura 5-8), está representado um modelo tridimensional do resultado final, onde o quadro está apresentado de cor azul, e a estrutura do suporte a cinzento, para distinção das duas partes.

---

<sup>4</sup> Junção das partes já desenvolvidas em *SolidWorks*

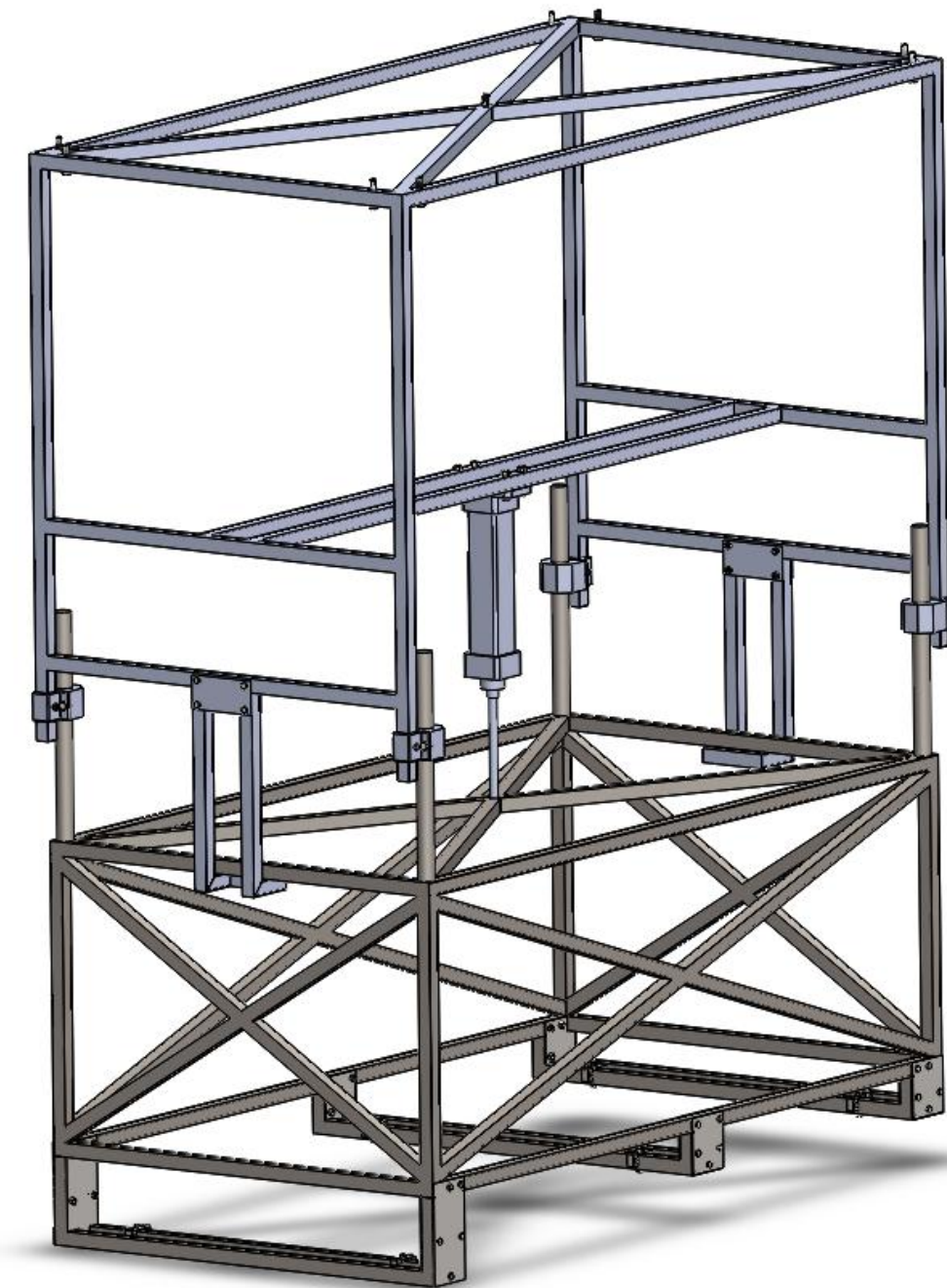


Figura 5-8: Modelo tridimensional do suporte de comparadores

### 5.2.7 Desenvolvimento do controlador do sistema pneumático

Desenvolvida a estrutura do suporte de comparadores e escolhido o atuador, resta, por fim, desenvolver o controlador do sistema pneumático. Como referido anteriormente, o mesmo é controlado por um operário presente na estação de trabalho e foi desenvolvido de maneira a simplificar a sua interface, resumindo o controlador a dois botões. Um dos botões acionará o deslocamento vertical, de cima para

baixo, do suporte por avanço da haste do atuador pneumático. O outro botão, causará o deslocamento de baixo para cima, por retorno da haste.

O controlador estará ligado a um circuito de ar comprimido, sendo composto por um atuador de dupla ação, uma válvula direcional pneumática solenoide de 4 vias e 2 posições estáveis e um sistema elétrico que controlará o comportamento da válvula.

Para efeitos de simulação do sistema pneumático, foi utilizado o programa *FluidSIM*. O princípio de funcionamento do sistema é simples. Quando o botão B1 é pressionado, Y1 é ativado e a válvula canaliza o fluído para que a haste do atuador se desloque para fora do cilindro. Quando B2 é pressionado, ocorre o oposto, e a haste é recolhida.

Na próxima figura (Figura 5-9) mostra-se o comportamento do sistema após o botão B1 ser pressionado:

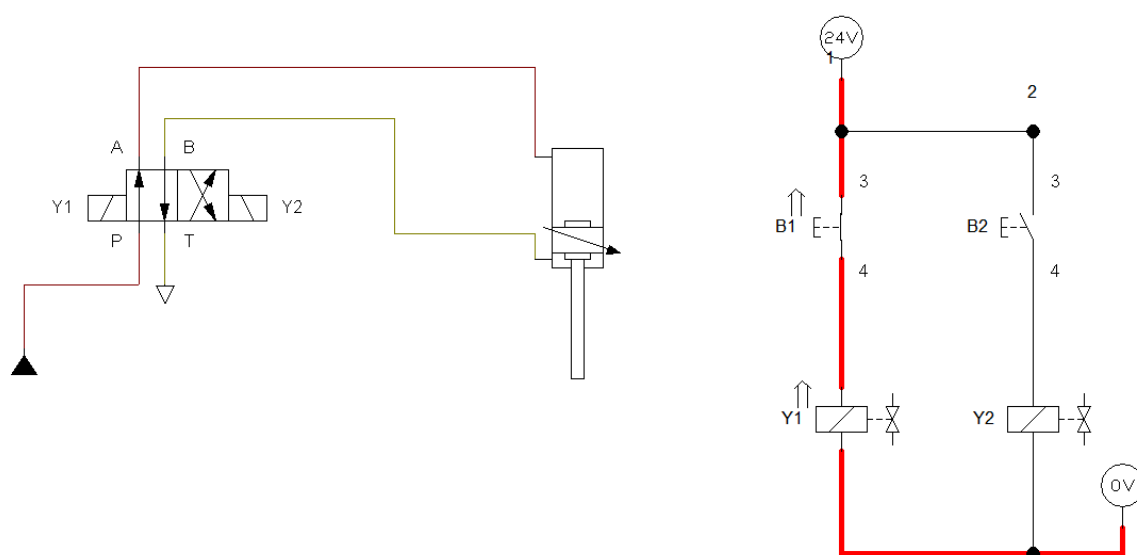


Figura 5-9: Sistema hidráulico após o botão B1 ser pressionado



De seguida, após B1 ser pressionado, se B2 for pressionado as hastes voltam à posição inicial, como é possível observar através da seguinte figura (Figura 5-10).

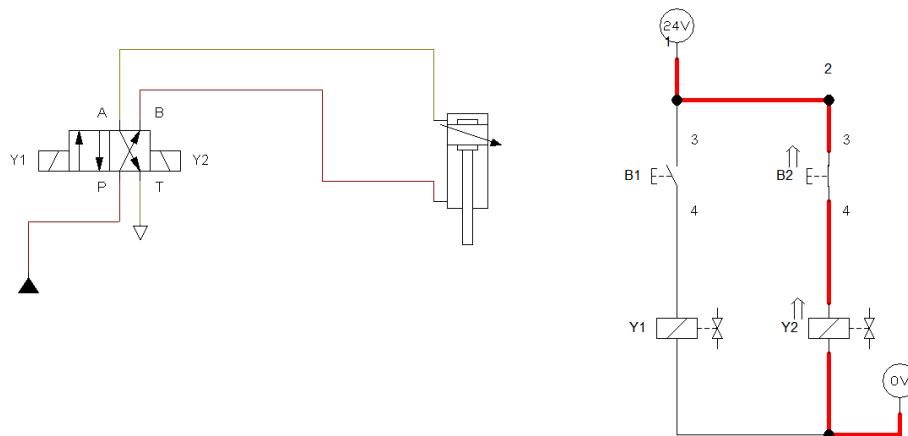


Figura 5-10: Sistema hidráulico após o botão B2 ser pressionado

Após introduzir todos os valores referentes ao atuador e ao sistema pneumático onde este será instalado, foi realizada uma simulação do processo a realizar na estação de trabalho e o tempo de execução de uma medição foi de 15 segundos.

Quando ambos os botões são pressionados ao mesmo tempo, o botão B2 prevalece B1, por encravamento elétrico, para evitar acidentes na estação de trabalho.



## Conclusões e proposta de trabalho futuro

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões relacionadas com o trabalho desenvolvido. Apresentam-se também propostas para trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusões

Após a conceção dos programas de alinhamento, verificação dos resultados obtidos e desenvolvimento do suporte de comparadores, conclui-se que a automatização de uma operação realizada nesta estação de trabalho pode reduzir muito os tempos de produção e, por consequência, aumentar a cadência de trabalho.

Neste projeto, foi desenvolvido um programa em linguagem *MATLAB*, capaz de indicar, instantaneamente, qual o ajuste que deverá ser aplicado para o alinhamento de dois vidros de um teto panorâmico. Como também é capaz de registar todos os valores resultantes da medição e de ajuste numa base de dados.

Como referido no final do capítulo 4 (Processamento dos valores medidos), obtiveram-se bons resultados nos programas desenvolvidos, com valores de erros absolutos baixos.

Por outro lado, após a simulação do funcionamento do sistema pneumático em *FluidSIM*, realizada no final do capítulo 5 (Desenvolvimento do suporte de comparadores), foram possíveis tirar conclusões quanto ao tempo de execução da operação de medição do desalinhamento.

No final, o objetivo de aumentar a cadência da estação de trabalho, através da automatização de uma operação, foi alcançado. Uma operação cujo tempo de realização ronda, nos dias de hoje, dois minutos e é executada com pouca precisão e sujeita a erros humanos, passa a ser realizada com exatidão, com precisão, em aproximadamente quinze segundos e deixa de estar sujeita a erros humanos. Esta operação, passa também a necessitar de apenas um operário, em vez de dois, para ser realizada.

Prevê-se que a aplicação deste projeto seja lucrativa para a empresa, visto aumentar a cadência de produção desta estação de trabalho, não trazer grandes custos a longo prazo e requerer um investimento baixo.

## 6.2 Trabalho futuro

Após concluir todo o desenvolvimento das linhas de código dos programas *MATLAB* e de realizar os respetivos testes, foi finalmente recebido o modelo tridimensional da superfície do tejadilho do veículo automóvel, enviado pela empresa. Como referido no capítulo 4 (Processamento dos valores medidos), o modelo tridimensional criado em *SolidWorks*, utilizado ao longo deste projeto, resulta da aproximação das projeções ortogonais da superfície do tejadilho. Assim, para aproximar mais do modelo real, seria necessário voltar a recriar as funções analíticas de interpolação por *splines* cúbicos, recorrendo a pontos retirados, desta vez, do modelo enviado pela empresa. Procedimento este que é simples de aplicar.

Uma vez que se irá retirar novamente pontos para obter as funções de aproximação da curvatura do tejadilho e do teto panorâmico, ter-se-á de ter em consideração o que foi referido nas conclusões e retirar mais pontos junto aos pontos de medição  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$ , para reduzir o valor do erro absoluto.

Após a devida correção dos programas de alinhamento, é necessário assegurar que as dimensões admitidas possam ser utilizadas neste novo modelo. Caso haja algum conflito basta reavaliar o projeto e o princípio lógico por detrás das decisões tomadas e realizar os respetivos ajustes. De seguida, após ter em consideração o toleranciamento das cotas nominais definidas, para assegurar que seja possível realizar a montagem sem interferências, resta elaborar um plano de processos, com a programação em *CNC* da maquinação das peças desenhadas anteriormente.

Finalmente, resta proceder à compra de todos os componentes necessários e conceber o projeto.

## Referências Bibliográficas

- [1] Blue, B. (2013, 18 de setembro). *Advantages and Disadvantages of Automation in Manufacturing*. Disponível em: <http://www.vista-industrial.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-automation-in-manufacturing/>
- [2] Silveira, C. B. (2016, 18 de novembro). *Sete benefícios conquistados através da Automação Industrial*. Disponível em <https://www.citisystems.com.br/sete-beneficios-automacao-industrial/>
- [3] Almeida, P. A. O. (2004, março). *Transdutores para medida de deslocamentos lineares*. Disponível em: <http://www.lem.ep.usp.br/pef5003/TRANSDUTORES-1.pdf>
- [4] Silveira, J. L. L. *Introdução ao comando Numérico*. Disponível em: [http://www.mecanica.ufrj.br/utl/b2evolution/media/blogs/joseluis/CNC\\_parte\\_3.pdf](http://www.mecanica.ufrj.br/utl/b2evolution/media/blogs/joseluis/CNC_parte_3.pdf)
- [5] Catálogo da Mitutoyo. Disponível em: <http://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2016/08/F-section.pdf>
- [6] Silveira, C. B. (2016, 17 de novembro). *Sensor Indutivo: O que é e como funciona*. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/sensor-indutivo/>
- [7] Thomas, A. K. (2001, 1 de setembro). *Proximity Sensors Compared: Inductive, Capacitive, Photoelectric, and Ultrasonic*. Disponível em: <http://machinedesign.com/sensors/proximity-sensors-compared-inductive-capacitive-photoelectric-and-ultrasonic>
- [8] Kok, B. G.. *Performing Contactless Respiration Rate Measurements Using an Optical Displacement Sensor and LabVIEW*. Institute of Space Science. Disponível em: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-14796#prettyPhoto>
- [9] Portugal, A. (2015, 21 de maio). *Como funcionam os sensores de distância ultrassônicos (HC-SR04)?*. Disponível em <http://www.arduinoportugal.pt/temas/como-funcionam-os-sensores-distancia-ultrassonicos-hc-sr04/>
- [10] *Sonar Principle*. Acedido em 27 de janeiro de 2017, em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonar\\_Principle\\_EN.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonar_Principle_EN.svg)
- [11] B. Freitas, Marco Antonio (2055, julho). *Medindo a velocidade do som com o microfone do PC*. Rio de Janeiro: Instituto de Física da UFRJ

- [12] Maini, R. e Aggarwal, H.. Study and Comparison of Various Image Edge Detection Techniques. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, Volume (3): Issue (1). Acedido em 13 de setembro de 2017, em: <http://www.math.tau.ac.il/~turkel/notes/Maini.pdf>
- [13] Collier, N., Kaw, A. e Paul, J. (2003). *Higher Order Interpolation is a Bad Idea*. University of South Florida. Acedido em 13 de setembro de 2017, em: <https://www.maplesoft.com/applications/view.aspx?SID=4373&view=html>
- [14] Merry, C.. *How does a Platform Lift work?*. Acedido em 13 de setembro de 2017, em: <http://www.invalifts.com/advice-centre/how-does-a-platform-lift-work.html>
- [15] Florêncio Augusto Chagas, S.A. *Tubos e Acess. Soldar*. Acedido em 13 de setembro de 2017, em: <http://www.chagas.pt/ESW/Files/ManualTecnico/05.pdf>
- [16] Mitutoyo. *Indicators*. Acedido em 13 de setembro de 2017, em: [http://www.eacampos.pt/fotos/editor2/metrologia/catalogo\\_2015/en/11\\_mitutoyo\\_gb20001\\_p248\\_p3\\_13\\_comparadores.pdf](http://www.eacampos.pt/fotos/editor2/metrologia/catalogo_2015/en/11_mitutoyo_gb20001_p248_p3_13_comparadores.pdf)
- [17] Bosch Rexroth AG. *Linear bushings*. Acedido em 13 de setembro de 2017, em: <http://www.equinotec.com/open/P9dWltiJ30NV>
- [18] Cunha, L. V. (2004). *Desenho Técnico*. 15ª Edição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.
- [19] Mourão, A. (2010). *Acabamentos e tolerâncias dimensionais*. Brochura de Toleranciamento de Sistemas Mecânicos. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

## Anexo A – Programa Matlab “*proc\_img.m*”

```
clear;
clc;
%
% Diretoria da imagem
cd C:\Users\Afonso\desktop;
%
% Leitura da imagem
i = imread('teto.jpg');
%
% Conversão para preto e branco
I = rgb2gray(i);
%
% Parâmetro de ajuste da sensibilidade na detecção dos contornos
sensitivity = 0;
%
% Aplicação dos métodos de processamento de imagem
%
% Roberts
edge_roberts = edge(I, 'Roberts');
% Prewitt
edge_prewitt = edge(I, 'Prewitt');
% Sobel
edge_sobel = edge(I, 'Sobel');
% LOG
edge_log = edge(I, 'log');
% Canny
edge_canny = edge(I, 'Canny', sensitivity);
%
% Apresentação dos resultados
imshow(edge_canny);
title('Canny');
figure, imshow(edge_log)
title('Laplaciano');
figure, imshow(edge_sobel)
title('Sobel');
figure, imshow(edge_prewitt);
title('Prewitt');
figure, imshow(edge_roberts);
title('Roberts');
```





## Anexo B – Programa Matlab “*alinhamento\_plano.m*”

```
function alinhamento_plano (A1,A2,B1,B2,C1,C2,D1,D2,deltaX,deltaY)
%
dif= 200; % distância máxima entre o suporte e o veículo
A1= dif-A1;
A2= dif-A2;
B1= dif-B1;
B2= dif-B2;
C1= dif-C1;
C2= dif-C2;
D1= dif-D1;
D2= dif-D2;
%
% CONSTANTES
%
% distância entre pontos de afinação em x
X= 860;
% distância entre pontos de afinação em y
Y= 950;
% distância entre sensores em x
Xa= 560;
% distância entre sensores em y
Ya= 1310;
%
% CÁLCULOS
%
a= A2-A1;
b= B2-B1;
c= C2-C1;
d= D2-D1;
%
% Apresentação dos valores medidos
disp('Valores medidos:');
disp(['A= ', num2str(a), ' mm']);
disp(['B= ', num2str(b), ' mm']);
disp(['C= ', num2str(c), ' mm']);
disp(['D= ', num2str(d), ' mm']);
disp(['Delta x= ', num2str(deltaX), ' mm']);
disp(['Delta y= ', num2str(deltaY), ' mm']);
%
% Cálculo do valor da tangente de alfa-teta
tg_alfa_teta= tan(atan((B2-A2)/Xa)-atan((B1-A1)/Xa));
%
% Cálculo do valor da tangente de beta-gama
tg_beta_gama= tan(atan((D2-A2)/Ya)-atan((D1-A1)/1390));
%
% Apresentação dos valores de inclinação do teto relativos ao tejadilho
alfa_teta= radtodeg(atan(tg_alfa_teta));
beta_gama= radtodeg(atan(tg_beta_gama));
disp(['Inclinação em x= ', num2str(alfa_teta), ' graus']);
disp(['Inclinação em y= ', num2str(beta_gama), ' graus']);
%
% Alinhamentos:
%
e= a-((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta+((1/2)*(Ya-
Y)+deltaY)*tg_beta_gama;
f= b+((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta+((1/2)*(Ya-
Y)+deltaY)*tg_beta_gama;
```

```

    g= c+((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta-((1/2)*(Ya-
Y)+deltaY)*tg_beta_gama;
    h= d-((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta-((1/2)*(Ya-
Y)+deltaY)*tg_beta_gama;
    e=-e;
    f=-f;
    g=-g;
    h=-h;
    %
    % Apresentação dos resultados obtidos:
    disp(' ');
    disp('Ajustes a realizar:');
    disp(['E= ', num2str(e), ' mm']);
    disp(['F= ', num2str(f), ' mm']);
    disp(['G= ', num2str(g), ' mm']);
    disp(['H= ', num2str(h), ' mm']);
end

```

## Anexo C – Funções de aproximação em Matlab

```
function z1=z1(val)
    xx= 0:0.001:1390;
    y= [0 10.549 30.605 46.460 58.514 67.458 73.863 77.519 78.587 80.484
81.674 82.029 81.627 80.401 78.977 78.093];
    x=[0 40 130 240 360 480 600 700 740 840 950 1050 1160 1270 1350 1390];
    yy= csapi(x,y);
    z1=fnval(yy,val);
end
```

```
function z2=z2(val)
    xx= -500:0.001:500;
    y= [22.128 32.978 40.707 46.626 50 46.626 40.707 32.978 22.128];
    x=[-500 -390 -280 -140 0 140 280 390 500];
    yy= csapi(x,y);
    z2=fnval(yy,val);
end
```

```
function z3=z3(val)
    xx= -500:0.001:500;
    y= [21.673 32.023 40.218 47.630 50 47.630 40.218 32.023 21.673];
    x=[-500 -390 -280 -130 0 130 280 390 500];
    yy= csapi(x,y);
    z3=fnval(yy,val);
end
```

```
function z4=z4(val)
    xx= -500:0.001:500;
    y= [29.562 37.156 42.798 47.161 50 47.161 42.798 37.156 29.562];
    x=[-500 -390 -280 -140 0 140 280 390 500];
    yy= csapi(x,y);
    z4=fnval(yy,val);
end
```

```
function z5=z5(val)
    xx= -500:0.001:500;
    y= [31.944 39.590 45.273 49.682 50 49.682 45.273 39.590 31.944];
    x=[-500 -390 -280 -140 0 140 280 390 500];
    yy= csapi(x,y);
    z5=fnval(yy,val);
end
```



## Anexo D – Programa Matlab “*alinhamento.m*”

```
function alinhamento (A1,A2,B1,B2,C1,C2,D1,D2,deltaX,deltaY)
%
dif= 200; % distância máxima entre o suporte e o veículo
A1= dif-A1;
A2= dif-A2;
B1= dif-B1;
B2= dif-B2;
C1= dif-C1;
C2= dif-C2;
D1= dif-D1;
D2= dif-D2;
%
% CONSTANTES
%
% distância entre pontos de afinação em x
X= 860;
% distância entre pontos de afinação em y
Y= 950;
% distância entre sensores em x
Xa= 560;
% distância entre sensores em y
Ya= 1310;
% distância ao sensor A em z2(x)
XA= -280;
% distância ao sensor B em z2(x)
XB= 280;
% distância ao sensor A em z1(y)
YA= 40;
% distância ao sensor B em z1(y)
YB= YA;
% distância ao sensor C em z1(y)
YC= 1350;
% distância ao sensor D em z1(y)
YD= YC;
% distância ao sensor C em z4(x)
XC= XB;
% distância ao sensor D em z4(x)
XD= XA;
% distância ao ponto de ajuste em z2(x) e z4(x)
xa1= -430;
% distância ao ponto de ajuste em z2(x) e z4(x)
xa2= -xa1;
% distância aos pontos de ajuste E e F em z1(y)
ya1= ((YA+YC)-Y)/2;
% distância aos pontos de ajuste G e H em z1(y)
ya2= (YA+YC)-ya1;
%
% Valores de calibração
c1=0;
c2=0;
%
% CÁLCULOS
%
a= A2-A1;
b= B2-B1;
c= C2-C1;
d= D2-D1;
```

```

%
% Apresentação dos valores medidos
disp('Valores medidos:');
disp(['A= ', num2str(a), ' mm']);
disp(['B= ', num2str(b), ' mm']);
disp(['C= ', num2str(c), ' mm']);
disp(['D= ', num2str(d), ' mm']);
disp(['Delta x= ', num2str(deltaX), ' mm']);
disp(['Delta y= ', num2str(deltaY), ' mm']);
%
% Cálculo do valor da tangente de alfa-teta
tg_alfa_teta= tan(atan(((B2-z3(XB+deltaX))-(A2-z3(XA+deltaX)))/Xa))-
atan(((B1-z2(XB+deltaX))-(A1-z2(XA+deltaX)))/Xa));
%
% Cálculo do valor da tangente de beta-gama
tg_beta_gama= tan(atan(((D2-z1(YD+deltaY))-(A2-z1(YA+deltaY)))/Ya)-
atan(((D1-z1((YA+YC)+deltaY))-(A1-z1(deltaY)))/(YA+YC))));
%
% Apresentação dos valores de inclinação do teto relativos ao tejadilho
alfa_teta= radtodeg(atan(tg_alfa_teta));
beta_gama= radtodeg(atan(tg_beta_gama));
disp(['Inclinação em x= ', num2str(alfa_teta), ' graus']);
disp(['Inclinação em y= ', num2str(beta_gama), ' graus']);
%
% Alinhamentos:
e= a-((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta+((1/2)*(Ya-
Y)+deltaY)*tg_beta_gama-(z3(XA)-z3(xa1))*cos(atan(tg_alfa_teta))+(z1(ya1)-
z1(YA))*cos(atan(tg_beta_gama))-z1(ya1)+(z3(XA)-z3(xa1))+c1;
f= b+((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta+((1/2)*(Ya-
Y)+deltaY)*tg_beta_gama-(z3(XB)-z3(xa2))*cos(atan(tg_alfa_teta))+(z1(ya1)-
z1(YB))*cos(atan(tg_beta_gama))-z1(ya1)+(z3(XB)-z3(xa2))+c1;
g= c+((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta-((1/2)*(Ya-
Y)+deltaY)*tg_beta_gama-(z4(XC)-z4(xa1))*cos(atan(tg_alfa_teta))+(z1(ya2)-
z1(YC))*cos(atan(tg_beta_gama))-(z1(ya2)-z1(YA+YC))+(z4(XC)-z4(xa2))+c2;
h= d-((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta-((1/2)*(Ya-
Y)+deltaY)*tg_beta_gama-(z4(XD)-z4(xa2))*cos(atan(tg_alfa_teta))+(z1(ya2)-
z1(YD))*cos(atan(tg_beta_gama))-(z1(ya2)-z1(YA+YC))+(z4(XD)-z4(xa1))+c2;
e=-e;
f=-f;
g=-g;
h=-h;
%
% Apresentação dos resultados obtidos:
disp(' ');
disp('Ajustes a realizar:');
disp(['E= ', num2str(e), ' mm']);
disp(['F= ', num2str(f), ' mm']);
disp(['G= ', num2str(g), ' mm']);
disp(['H= ', num2str(h), ' mm']);
end

```

## Anexo E – Restantes funções de aproximação em Matlab

```
function z7=z7(val)
    xx= -500:0.001:500;
    y= [10.361 17.081 21.897 24.660 25 24.660 21.897 17.081 10.361];
    x=[-500 -390 -280 -140 0 140 280 390 500];
    yy= csapi(x,y);
    z7=fnval(yy,val);
end
```

```
function z8=z8(val)
    xx= -500:0.001:500;
    y= [10.377 17.010 21.802 24.720 25 24.720 21.802 17.010 10.377];
    x=[-500 -390 -280 -140 0 140 280 390 500];
    yy= csapi(x,y);
    z8=fnval(yy,val);
end
```





## Anexo F – Programa Matlab “*ajuste.m*”

```
function ajuste(A1,A2,B1,B2,C1,C2,D1,D2,I1,I2,J1,J2,deltaX,deltaY)
%
dif= 200; % distância máxima entre o suporte e o veículo
A1= dif-A1;
A2= dif-A2;
B1= dif-B1;
B2= dif-B2;
C1= dif-C1;
C2= dif-C2;
D1= dif-D1;
D2= dif-D2;
I1= dif-I1;
I2= dif-I2;
J1= dif-J1;
J2= dif-J2;
%
% CONSTANTES
%
% distância entre pontos de afinação em x
X= 860;
% distância entre pontos de afinação em y
Y= 950;
% distância entre pontos de afinação em y da parte 1
Y1= 500;
% distância entre pontos de afinação em y da parte 2
Y2= 450;
% distância entre sensores em x
Xa= 560;
% distância entre sensores em y da parte 1
Ya1= 660;
% distância entre sensores em y da parte 2
Ya2= 610;
% distância ao sensor A em z2(x)
XA= -280;
% distância ao sensor B em z2(x)
XB= -XA;
% distância ao sensor I em z5(x) e z6(x)
XI= XA;
% distância ao sensor J em z5(x) e z6(x)
XJ= XB;
% distância ao sensor A em z1(y)
YA= 40;
% distância ao sensor B em x1(y)
YB= YA;
% distância ao sensor C em x1(y)
YC= 1350;
% distância ao sensor D em x1(y)
YD= YC;
% distância ao sensor I1 em x1(y)
YI1= 700;
% distância ao sensor I2 em x1(y)
YI2= YI1+40;
% distância ao sensor J em x1(y)
YJ1= YI1;
% distância ao sensor J em x1(y)
YJ2= YI2;
```

```

% distância ao sensor C em y4(x)
XC= XB;
% distância ao sensor D em y4(x)
XD= XA;
% distância ao ponto de ajuste E, K e H em y2(x) e y4(x)
xa1= -430;
% distância ao ponto de ajuste F, l e G em y2(x) e y4(x)
xa2= -xa1;
% distância ao ponto de ajuste E e F em x1(y)
ya1= ((YA+YC)-Y)/2;
% distância ao ponto de ajuste C e D em x1(y)
ya2= (YA+YC)-ya1;
% distância ao ponto de ajuste K e L em x1(y)
ya3= YI1+20;
%
% Valores de calibração
c1= 0;
c2= 0;
c3= 0;
c4= 0;
%
% CÁLCULOS
%
a= A2-A1;
b= B2-B1;
c= C2-C1;
d= D2-D1;
i= I2-I1;
j= J2-J1;
%
% Apresentação dos valores medidos
disp('Valores medidos:');
disp(['A= ', num2str(a), ' mm']);
disp(['B= ', num2str(b), ' mm']);
disp(['C= ', num2str(c), ' mm']);
disp(['D= ', num2str(d), ' mm']);
disp(['I= ', num2str(i), ' mm']);
disp(['J= ', num2str(j), ' mm']);
disp(['Delta x= ', num2str(deltaX), ' mm']);
disp(['Delta y= ', num2str(deltaY), ' mm']);
%
% Cálculo do valor da tangente de alfa-teta parte 1
tg_alfa_teta_1= tan(atan(((B2-z3(XB+deltaX))-(A2-z3(XA+deltaX)))/Xa))-
atan(((B1-z2(XB+deltaX))-(A1-z2(XA+deltaX)))/Xa));
% Cálculo do valor da tangente de alfa-teta parte 2
tg_alfa_teta_2= tan(atan(((C2-z4(XC+deltaX))-(D2-z4(XD+deltaX)))/Xa))-
atan(((C1-z5(XC+deltaX))-(D1-z5(XD+deltaX)))/Xa));
%
% Cálculo do valor da tangente de beta-gama parte 1
tg_beta_gama_1= tan(atan(((I1-z1(YI1+deltaY))-(A2-z1(YA+deltaY)))/Ya1)-
atan(((D1-z1(YD+YA+deltaY))-(A1-z1(deltaY)))/(YD+YA)));
%
% Cálculo do valor da tangente de beta-gama parte 2
tg_beta_gama_2= tan(atan(((D2-z1(YD+deltaY))-(I2-z1(YI2+deltaY)))/Ya2)-
atan(((D1-z1(YA+YD+deltaY))-(A1-z1(deltaY)))/(YD+YA)));
%
%
% Apresentação dos valores de inclinação do teto relativos ao tejadilho
alfa_teta_1= radtodeg(atan(tg_alfa_teta_1));
beta_gama_1= radtodeg(atan(tg_beta_gama_1));

```

```

disp(['Inclinação em x (parte 1)= ', num2str(alfa_teta_1), ' graus']);
disp(['Inclinação em y (parte 1)= ', num2str(beta_gama_1), ' graus']);
alfa_teta_2= radtodeg(atan(tg_alfa_teta_2));
beta_gama_2= radtodeg(atan(tg_beta_gama_2));
disp(['Inclinação em x (parte 2)= ', num2str(alfa_teta_2), ' graus']);
disp(['Inclinação em y (parte 2)= ', num2str(beta_gama_2), ' graus']);
%
% Alinhamentos:
%
% Parte 1
e= a-((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta_1+(ya1-
YA+deltaY)*tg_beta_gama_1-(z3(XA)-
z3(xa1))*cos(atan(tg_alfa_teta_1))+(z1(ya1)-
z1(YA))*cos(atan(tg_beta_gama_1))-z1(ya1)+(z3(XA)-z3(xa1))+c1;
f= b+((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta_1+(ya1-
YB+deltaY)*tg_beta_gama_1-(z3(XB)-
z3(xa2))*cos(atan(tg_alfa_teta_1))+(z1(ya1)-
z1(YB))*cos(atan(tg_beta_gama_1))-z1(ya1)+(z3(XB)-z3(xa2))+c1;
k1= (I1-D1)-((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta_1+(ya3-
YI1+deltaY)*tg_beta_gama_1-(z7(XI)-
z7(xa1))*cos(atan(tg_alfa_teta_1))+(z1(ya3)-
z1(YI1))*cos(atan(tg_beta_gama_1))+(z1(YA+YC)-z1(ya3))+(z7(XI)-z7(xa1))+c2;
l1= (J1-C1)+((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta_1+(ya3-
YJ1+deltaY)*tg_beta_gama_1-(z7(XJ)-
z7(xa1))*cos(atan(tg_alfa_teta_1))+(z1(ya3)-
z1(YJ1))*cos(atan(tg_beta_gama_1))+(z1(YA+YC)-z1(ya3))+(z7(XJ)-z7(xa2))+c2;
e=-e;
f=-f;
k1=-k1;
l1=-l1;
%
% Parte 2
k2= (I2-A1)-((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta_2-(YI2-
ya3+deltaY)*tg_beta_gama_2-(z8(XI)-z8(xa1))*cos(atan(tg_alfa_teta_2))-
(z1(YI2)-z1(ya3))*cos(atan(tg_beta_gama_2))-z1(ya3)+(z8(XI)-z8(xa1))+c3;
l2= (J2-B1)+((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta_2-(YJ2-
ya3+deltaY)*tg_beta_gama_2-(z8(XJ)-z8(xa1))*cos(atan(tg_alfa_teta_2))-
(z1(YJ2)-z1(ya3))*cos(atan(tg_beta_gama_2))-z1(ya3)+(z8(XJ)-z8(xa2))+c3;
g= c+((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta_2-(YC-
ya2+deltaY)*tg_beta_gama_2-(z4(XC)-
z4(xa1))*cos(atan(tg_alfa_teta_2))+(z1(ya2)-
z1(YC))*cos(atan(tg_beta_gama_2))-(z1(ya2)-z1(YA+YC))+(z4(XC)-z4(xa2))+c4;
h= d-((1/2)*(X-Xa)+deltaX)*tg_alfa_teta_2-(YD-
ya2+deltaY)*tg_beta_gama_2-(z4(XD)-
z4(xa2))*cos(atan(tg_alfa_teta_2))+(z1(ya2)-
z1(YD))*cos(atan(tg_beta_gama_2))-(z1(ya2)-z1(YA+YD))+(z4(XD)-z4(xa1))+c4;
k2=-k2;
l2=-l2;
g=-g;
h=-h;
%
% Apresentação dos resultados obtidos:
disp(' ');
disp('Ajustes a realizar:');
disp(['E= ', num2str(e), ' mm']);
disp(['F= ', num2str(f), ' mm']);
disp(['G= ', num2str(g), ' mm']);
disp(['H= ', num2str(h), ' mm']);
disp(['K1= ', num2str(k1), ' mm']);
disp(['K2= ', num2str(k2), ' mm']);

```

```

disp(['L1= ', num2str(l1), ' mm']);
disp(['L2= ', num2str(l2), ' mm']);
%
% Escrita dos valores obtidos na base de dados
BD= fopen('base_dados.txt','a');
fprintf(BD, '*****\n');
fprintf(BD, 'Carro ID: %d\n', id);
fprintf(BD, 'Valores medidos:\n');
fprintf(BD, 'A= %f mm\n', a);
fprintf(BD, 'B= %f mm\n', b);
fprintf(BD, 'C= %f mm\n', c);
fprintf(BD, 'D= %f mm\n', d);
fprintf(BD, 'I= %f mm\n', i);
fprintf(BD, 'J= %f mm\n', j);
fprintf(BD, 'Inclinação em x (parte 1)= %f graus\n', alfa_teta_1);
fprintf(BD, 'Inclinação em y (parte 1)= %f graus\n', beta_gama_1);
fprintf(BD, 'Inclinação em x (parte 2)= %f graus\n', alfa_teta_2);
fprintf(BD, 'Inclinação em y (parte 2)= %f graus\n\n', beta_gama_2);
fprintf(BD, 'Ajustes:\n');
fprintf(BD, 'E= %f mm\n', e);
fprintf(BD, 'F= %f mm\n', f);
fprintf(BD, 'G= %f mm\n', g);
fprintf(BD, 'H= %f mm\n', h);
fprintf(BD, 'K1= %f mm\n', k1);
fprintf(BD, 'K2= %f mm\n', k2);
fprintf(BD, 'L1= %f mm\n', l1);
fprintf(BD, 'L2= %f mm\n', l2);
fprintf(BD, '*****\n\n');
fclose(BD);
end

```

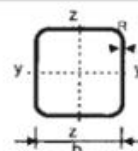
## Anexo G – Tabela do fornecedor Chagas para tubo estrutural laminado a quente quadrado

### Tubo Estrutural Laminado a Quente Quadrado

**CHAGAS**

Norma Dimensional - EN 10210-1

Material S355 J2 H



b mm	t mm	M Kg/m	A cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	i cm	W <sub>el</sub> cm <sup>3</sup>	W <sub>pl</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	C <sub>t</sub> cm <sup>3</sup>	S m <sup>2</sup> /ton
25	2	1,41	1,797	1,561	0,932	1,249	1,534	2,524	1,811	67,24
25	3	2,12	2,343	1,999	0,885	1,599	2,06	3,33	2,299	46,22
25	4	2,5	3,188	2,51	0,8402	1,801	2,438	3,895	2,575	35,84
30	2	1,72	2,197	2,837	1,136	1,891	2,288	4,532	2,754	66,59
30	3	2,47	3,143	3,743	1,091	2,495	3,138	6,164	3,601	45,5
30	4	3,13	3,988	4,358	1,045	2,906	3,805	7,388	4,169	35,04
30	5	3,71	4,732	4,721	0,9989	3,147	4,297	8,21	4,498	28,84
35	4	3,76	4,788	7,485	1,25	4,277	5,472	12,48	6,155	34,51
35	6	5,16	6,574	8,808	1,158	5,033	6,914	15,37	7,19	21,14
40	2	2,35	2,997	7,153	1,545	3,577	4,247	11,25	5,237	65,82
40	3	3,41	4,343	9,775	1,5	4,888	5,97	15,74	7,097	44,66
40	4	4,39	5,588	11,83	1,455	5,915	7,439	19,48	8,536	34,12
40	5	5,28	6,732	13,37	1,409	6,684	8,663	22,5	9,602	27,84
40	6	6,1	7,774	14,44	1,363	7,22	9,652	24,8	10,34	23,69
45	4	5,01	6,388	17,59	1,659	7,819	9,706	28,68	11,31	33,84
45	5	6,07	7,732	20,14	1,614	8,952	11,41	33,5	12,89	27,54
50	3	4,35	5,543	20,2	1,909	8,08	9,702	32,06	11,79	44,18
50	4	5,64	7,188	24,97	1,864	9,99	12,27	40,39	14,49	33,62
50	5	6,85	8,732	28,88	1,819	11,55	14,53	47,56	16,67	27,3
50	6	7,99	10,17	31,98	1,773	12,79	16,48	53,6	18,39	23,11
50	8	10	12,75	36,01	1,68	14,4	19,5	62,32	20,6	17,92
60	3	5,29	6,743	36,21	2,317	12,07	14,33	56,95	17,68	43,88
60	4	6,9	8,788	45,39	2,273	18,21	18,31	72,51	22,03	33,3
60	5	8,42	10,73	53,26	2,228	17,75	21,89	86,4	25,72	26,96
60	6	9,87	12,57	59,89	2,182	19,96	25,11	98,63	28,81	22,75
60	8	12,5	15,95	69,73	2,091	23,24	30,44	118,2	33,35	17,52
60	10	14,9	19,93	75,54	1,998	25,18	34,38	131,4	35,99	14,42
70	3	6,24	7,943	59,02	2,726	16,86	19,87	92,19	24,76	43,66
70	4	8,15	10,39	74,69	2,681	21,34	25,54	118,2	31,16	33,07
70	5	9,99	12,73	88,5	2,637	25,29	30,76	142	36,76	26,73
70	6	11,8	14,97	100,6	2,591	28,73	35,53	163,5	41,6	22,51
70	8	15	19,15	119,8	2,5	34,22	43,77	199,7	49,24	17,25
70	10	18	22,93	133	2,408	37,99	50,34	227,1	54,45	14,13
80	3	7,18	9,143	89,82	3,134	22,46	26,3	139,6	33,04	43,51
80	4	9,41	11,99	114,5	3,09	28,61	33,98	180	41,9	32,91
80	5	11,6	14,73	136,6	3,045	34,15	41,13	217,4	49,79	26,56
80	6	13,6	17,37	156,4	3	39,1	47,76	251,8	56,78	22,33
80	8	17,5	22,35	189,3	2,91	47,32	59,51	311,7	68,29	17,06
80	10	21,1	25,93	213,9	2,818	53,47	69,3	360	76,82	13,92
80	12	24,4	31,09	231	2,726	57,76	77,22	396,9	82,7	11,84
90	3	8,12	10,34	129,8	3,543	28,85	33,63	200,9	42,53	43,39
90	4	10,7	13,59	166,3	3,498	36,95	43,61	260,1	54,23	32,78
90	5	13,1	15,73	199,6	3,454	44,35	52,99	315,5	64,81	26,43
90	6	15,5	19,77	229,8	3,409	51,07	61,79	367,1	74,31	22,2
90	8	20,1	25,55	281,5	3,319	62,55	77,65	459	90,5	16,92
90	10	24,3	30,93	322,3	3,228	71,61	91,27	536	103,1	13,77
90	12	28,2	35,89	353	3,136	78,45	102,7	598,4	112,6	11,68



## Anexo H – Tabelas do fornecedor Mitutoyo de comparadores digitais

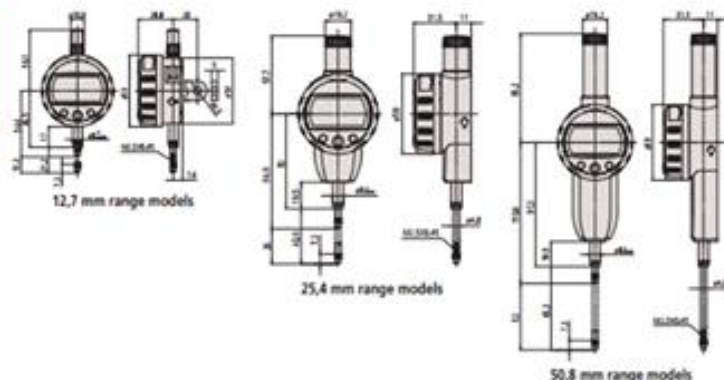
### ABSOLUTE Digimatic Indicator ID-C

#### Series 543

This is a multifunction indicator that is reliable and easy to use.

The ABSOLUTE Digimatic Indicator ID-C offers you the following benefits:

- The ABSOLUTE sensor means you don't have to carry out origin setting every time you power it on, saving you time and hassle.
- GO/NG judgement is performed by setting the upper and lower tolerances.
- You can make simple calculations by a user-definable factor using the formula  $Ax$  ( $x$  is spindle displacement).
- Large character height of 11mm provides good readability.
- Display 330° rotatable.
- A function lock protects the display against unauthorised use.



Calculation :  $fx(x) = Ax$

Mounting the ID-C on a measuring fixture and setting the multiplying factor "A" (between 0,0001 and 99,9999) allows direct measurement without using a conversion table and improves measurement efficiency



330° rotary display

The display can be rotated 330°, allowing use at a position where you can easily read the measurement value



Function locking

Ensures reliability of measurement by locking the settings to prevent preset function settings from being changed by mistake



Large LCD

The large LCD incorporates 11 mm characters making measurement values much easier to read



Tolerance function

2 kinds of tolerance visualisation

Mitutoyo

252

All products to be sold to commercial customers. Product illustrations are without obligation. Product descriptions, in particular any and all technical specifications, are only binding when explicitly agreed upon. For suggested retail prices, please refer to the separate price list.



Functions	Series 543
ZERO/ABS	●
GOLING judgement	●
Digimatic data output	●
ON/OFF	●
DATA/HOLD	●
Lock function	●
PRESET	●
Counting direction switchable	●
Calculation function	●
Selectable resolution*	●

#### Specifications

Accuracy	Refer to the list of specifications (excluding quantizing error)
Scale	Capacitance type, ABSOLUTE linear encoder
Max. response speed	Unlimited
Stem Ø	8 mm (ISO/JS type)
Contact point	Carbide ball, thread M 2,5 x 0,45 mm (ISO/JS type)
Alarm	Low voltage, counting value composition error, overflow error, tolerance limit setting error
Power supply	1 battery SR44
Battery life	approx. 7000 hours
Display	LCD character height 11 mm Rotatable 330°

#### Optional accessories

No.	Description
540774	Spindle lifting cable 500 mm length
901975	Spindle lifting cable 300 mm
21EZA198	Spindle lifting lever (12,7 models)
21EZA105	Spindle lifting knob (12,7 models)
21EZA197	Spindle lifting knob (25,4 models)
21EZA200	Spindle lifting knob (50 models)
137693	Spindle lifting handle
02ACA571	Auxiliary spindle spring (25,4 models)
02ACA773	Auxiliary spindle spring (50 models)
<b>Digimatic Signal Cables</b>	
905338	Digimatic cable (1 m)
905409	Digimatic cable (2 m)
02AZD790F	Connecting cable U-Wave
06ADV380F	USB Input Tool Direct cable (2 m)

02ACA571/02ACA773: required when orienting the indicator upside down  
21EZA105: not available for low measuring force models  
540774: moving measuring range max. 28 mm

#### Consumable spares

No.	Description
938882	Battery SR44
901312	Standard contact point

\*0,001 mm type

## ABSOLUTE Digimatic Indicator ID-C

### Series 543

#### Metric

No.	No. Log back plate	Range [mm]	Measuring force [N]	Digital step	Accuracy	Remarks	Mass [g]
543-390B	543-390	12,7	≤ 1,5	0,001/0,01 mm	0,003 mm		170
543-394B	543-394	12,7	≤ 0,4-0,7	0,001/0,01 mm	0,003 mm	Low force	170
543-400B	543-400	12,7	≤ 0,9	0,01 mm	0,02 mm		170
543-404B	543-404	12,7	≤ 0,3-0,5	0,01 mm	0,02 mm	Low force	170
543-470B		25,4	≤ 1,8	0,001/0,01 mm	0,003 mm		190
543-474B		25,4	≤ 1,8	0,01 mm	0,02 mm		190
543-490B		50,8	≤ 2,3	0,001/0,01 mm	0,005 mm		260
543-494B		50,8	≤ 2,3	0,01 mm	0,04 mm		260

No. with "B": Flat back plate

Specification low measuring force models: see below



### Setting measuring force on low measuring force models

#### •543-404/404B

Spindle orientation	Spring	Weight (approximately 0,110)	Maximum measuring force
Pointing vertically downward	Yes	Yes	0,5N
	Yes	No	0,4N
	No	Yes	0,3N
	No	No	0,2N
Horizontal	Yes	No	0,2N

#### •543-394/394B

Spindle orientation	Spring	Weight (approximately 0,110)	Maximum measuring force
Pointing vertically downward	Yes	Yes	0,7N
	Yes	No	0,6N
	No	Yes	0,4N
	No	No	Not defined
Horizontal	Not defined		



# Anexo I – Tabelas do fornecedor Rexroth das guias

eLINE and compact linear sets

## eLINE linear sets, R1027 Closed, normal or stainless

### Design

- eLINE linear bushing
- Lightweight precision housing (aluminum)
- Integrated wiper seals
- **Reduced radial clearance**
- Initial lubrication with Dynalub 510
- Also available in stainless steel under KBC-NR

**Closed**



## Compact linear sets, R1027 Closed, normal or stainless

### Design

- Compact linear bushing
- Lightweight precision housing (aluminum)
- Integrated wiper seals
- **Normal radial clearance**
- Initial lubrication with Dynalub 510
- Also available in stainless steel under KBC-NR

## Compact linear sets, R1028 Adjustable, normal

### Design

- Compact linear bushing
- Lightweight precision housing (aluminum)
- Integrated wiper seals
- **Set to zero clearance**
- Initial lubrication with Dynalub 510

**Adjustable**



Shaft Ø d (mm)	Material number with eLINE linear set		Weight  (kg)
	Reduced radial clearance, prelubricated		
	Normal LSAC- ... -DD-RT-G	Stainless LSAC- ... -DD-RT-NR-G	
12	R1027 251 44	R1027 251 34	0.08
16	R1027 252 44	R1027 252 34	0.11
20	R1027 253 44	R1027 253 34	0.15
25	R1027 254 44	R1027 254 34	0.27
30	R1027 255 44	R1027 255 34	0.40
40	R1027 256 44	R1027 256 34	0.75

Shaft Ø d (mm)	Material number with compact linear set		Weight (kg)
	Prelubricated Normal LSAC- ... -DD-G	Stainless LSAC- ... -DD-NR-G	
12	R1027 212 44	R1027 212 34	0.08
16	R1027 216 44	R1027 216 34	0.11
20	R1027 220 44	R1027 220 34	0.15
25	R1027 225 44	R1027 225 34	0.27
30	R1027 230 44	R1027 230 34	0.40
40	R1027 240 44	R1027 240 34	0.75
50	R1027 250 44	R1027 250 34	1.20

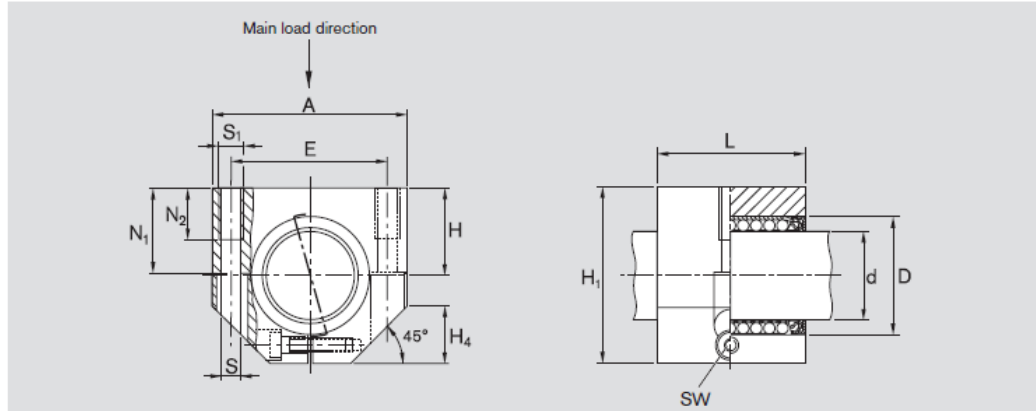
Shaft Ø d (mm)	Material number with compact linear set Normal, prelubricated LSACE- ... -DD-G	Weight (kg)
12	R1028 212 44	0.08
16	R1028 216 44	0.11
20	R1028 220 44	0.15
25	R1028 225 44	0.27
30	R1028 230 44	0.40
40	R1028 240 44	0.75
50	R1028 250 44	1.20

### Explanation of sample short product name

LS	A	C	12	DD	RT	NR	G
Linear set	Aluminum	Compact	Ø 12	With two seals	Reduced radial clearance	Stainless steel	Greased

See page 28 for more information on short product names.

## Dimensions



Dimensions (mm)												
Ø d	D	H	H <sub>1</sub>	A	L	E ±0.15	S <sup>1)</sup>	S <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>4</sub>	SW
12	19	17	33	40	28	29	4.3	M5	16	11	11	2.5
16	24	19	38	45	30	34	4.3	M5	18	11	13	2.5
20	28	23	45	53	30	40	5.3	M6	22	13	15	3.0
25	35	27	54	62	40	48	6.6	M8	26	18	17	4.0
30	40	30	60	67	50	53	6.6	M8	29	18	19	4.0
40	52	39	76	87	60	69	8.4	M10	38	22	24	5.0
50	62	47	92	103	70	82	10.5	M12	46	26	30	6.0

Ø d (mm)	Radial clearance (µm)			Tolerance for H <sup>2)</sup> (µm)		Load ratings <sup>3)</sup> (N)			
	R1027 eLINE, compact h6	R1027 Compact h6	R1028	R1027	R1028	Normal		Stainless	
12	+8 -24	+32 0	Comes clamped to h5 shaft (lower limit) and set to zero clearance	+24 0	+12 -12	dyn. C	stat. C <sub>0</sub>	dyn. C	stat. C <sub>0</sub>
16	+8 -24	+32 0		+24 0	+12 -12	810	490	570	390
20	+9 -25	+33 -1		+25 0	+13 -12	1,050	570	730	460
25	+12 -24	+36 0		+25 0	+13 -12	1,410	900	990	720
30	+12 -24	+36 0		+25 0	+13 -12	2,930	1,950	2,050	1,560
40	+18 -25	+42 -1		+26 0	+14 -12	3,850	2,790	2,700	2,230
50	+42 -1	+42 -1		+14 -12	+14 -12	6,380	4,650	4,470	3,720
						7,180	5,350	5,030	4,280

- 1) ISO 4762-8.8 fastening bolts.
- 2) In relation to Ø d.
- 3) The load ratings apply for the main load direction. If the load direction is not the main load direction, the load ratings must be multiplied by the following factors.

Ø d 12 and 16:  $f = 0.90$ ,  $f_0 = 0.86$

Ø d 20 to 50:  $f = 0.79$ ,  $f_0 = 0.68$

The dynamic load ratings are based on a total travel of 100,000 m.  
When based on 50,000 m, the C values in the table are multiplied by 1.26.

## Anexo J – Tabelas do fornecedor Parker dos atuadores pneumáticos

Catálogo 1001-6 BR  
Informações técnicas

Cilindros pneumáticos  
ISO - Série P1E

### Informações adicionais

#### Consumo de ar

$$C = \frac{A \times L \times n_c \times (p_t + 1,013)}{1,013 \times 10^6}$$

C = Consumo de ar (l/seg)  
A = Área efetiva do pistão (mm²)  
L = Curso (mm)  
n<sub>c</sub> = Número de ciclos por segundo  
p<sub>t</sub> = Pressão (bar)

#### Forças teóricas (N)

Diâmetro do cilindro (mm)	Diâmetro da haste (mm)	Área efetiva (mm²)		Força teórica a 6 bar (N)	
		Avanço	Retorno	Avanço	Retorno
32	12	804,25	691,15	482,55	414,69
40	16	1256,64	1055,58	753,98	633,35
50	20	1963,50	1649,34	1178,10	989,60
63	25	3117,25	2803,09	1870,35	1681,85
80	32	5026,55	4535,67	3015,93	2721,40
100	40	7853,98	7363,11	4712,39	4417,86
125	50	12271,85	11467,60	7363,11	6880,56
160	63	20106,19	18849,56	12063,72	11309,73
200	80	31415,93	30159,29	18849,56	18095,57

#### Peso

Ø do cilindro (mm)	32	40	50	63	80	100	125	160	200
Curso "0" (kg)	0,900	0,950	1,920	1,950	3,040	4,020	7,300	12,400	15,500
5 mm de Curso (kg)	0,020	0,025	0,027	0,030	0,042	0,055	0,068	0,107	0,119

#### Curso padrão (de acordo com a Norma ISO 4393)

Versão	Ø (mm)	Curso padrão (mm)												
		25	30	40	50	80	100	125	160	200	250	320	400	500
Dupla ação	32	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	40	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	50	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	63	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	80	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	125	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	160	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	200	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*



Automation

## Gabarito de codificação

**P 1 E -**

**Ø do cilindro mm**

032
040
050
<b>063</b>
080
100
125
160
200

**Tipo**

<b>G</b>	Tubo perfurado com canal para sensor
T	Tirantado
D	Tirantado com munhão

**Tipo de vedação/pistão**

<b>A</b>	Vedação standard sem êmbolo magnético
B	Vedação de FKM sem êmbolo magnético
S	Vedação standard com êmbolo magnético
V	Vedação de FKM com êmbolo magnético

**Versões**

<b>M</b>		Dupla ação com amortecimento
F		Haste passante com amortecimento
D		Dupla ação sem amortecimento
K		Haste passante sem amortecimento

**Curso \*\***

Curso padrão  
Ex.: 0100 = 100 mm

\*\* Conforme tabela página 30.

**Prolongamento da haste**

Omitir	Sem prolongamento
L x x x	Haste com prolongamento xxx = Valor do prolongamento da haste em mm
XI x x x x	Para montagem por munhão central valor da cota (XI + 1/2 curso) em mm. Quando for diferente do standard. Ver página 35

**Tipo de montagem**

Omitir	Montagem básica
1	Flange dianteira ISO MF1
<b>2</b>	Flange traseira ISO MF2
3	Cantoneiras ISO MS1
4	Articulação traseira fêmea com pino e anéis elásticos ISO MP2
5	Articulação traseira macho ISO MP4
6	Munhão dianteiro (2)
7	Munhão traseiro (2)

**Opção**

Omitir	Sem opção
B	Com santona de proteção ver notas (3)

**Material da haste**

Omitir	Inox
0	SAE 1045

**Rosca de alimentação**

Omitir	G (BSP)
N	NPT

**Ø cilindro (mm)**

32	22
40	22
50	38
<b>63</b>	<b>48</b>
80	56
100	60
125	80
160	80
200	120

**Curso mínimo recomendado para cilindro com amortecimento**

**Material**

Vedações	Santona	Sem êmbolo magnético	Com êmbolo magnético
NBR	NBR	-10°C a +80°C	-10°C a +80°C
FKM	NBR	-10°C a +80°C	-10°C a +80°C
NBR	CR	-10°C a +120°C	-10°C a +80°C
FKM	CR	-10°C a +120°C	-10°C a +80°C
FKM	-	-10°C a +180°C	-10°C a +80°C

**Faixa de temperatura**

(1) - Cilindro com tubo perfurado com canal para sensor disponível somente nos diâmetros: 32, 40, 50, 63, 80 e 100 mm.

(2) - Disponível somente nos diâmetros: 32, 40, 50, 63, 80 e 100 mm.

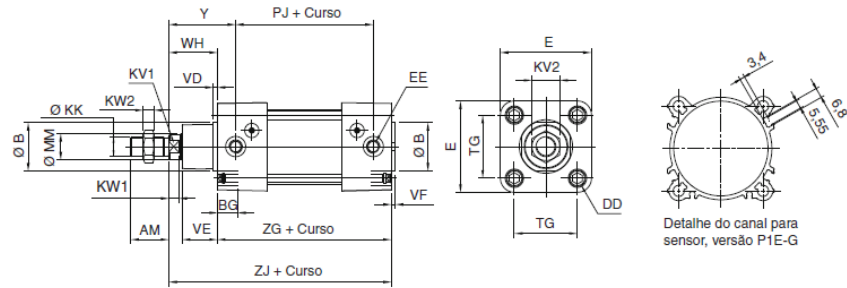
(3) - Não disponível na versão com munhão dianteiro.

➤ Para aplicação com sensor magnético, o mesmo deverá ser solicitado separadamente (ver referência páginas 39 e 40).

➤ Curso mínimo do cilindro para utilização de sensores: 25 mm

## Dimensões

### Básico



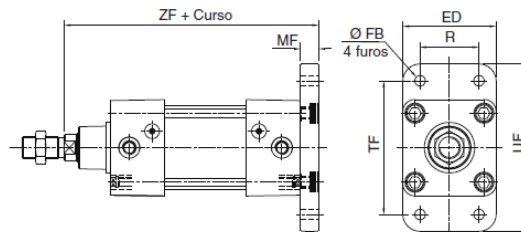
Ø cil.	ØMM	ØKK	ØB	EE	DD	ZG	ZJ	Y	KW2	PJ	WH	VD	VE	VF	E	TG	BG	AM	KW1	KV2	KV1
32	12	M10x1,25	30	1/8"	M6x1	94	120	39,5	6	67	26	4	20	4	46,5	32,5	15	22	6	17	10
40	16	M12x1,25	35	1/4"	M6x1	105	135	45,0	7	75	30	4	21,5	4	52	38	15	24	6	19	13
50	20	M16x1,5	40	1/4"	M8x1,25	106	143	54,0	8	72	37	4	29	4	64	46,5	18	32	7	24	17
63	20	M16x1,5	45	3/8"	M8x1,25	121	158	53,0	8	89	37	4	29	4	74	56,5	18	32	7	24	17
80	25	M20x1,5	45	3/8"	M10x1,5	128	174	62,0	9	96	46	4	35	4	96	72	20,5	40	10	30	22
100	25	M20x1,5	55	1/2"	M10x1,5	138	189	69,0	9	102	51	4	35	4	113	89	20,5	40	10	30	22
125	32	M27x2	60	1/2"	M12x1,75	160	225	85,0	12	120	65	7	41	5	140	110	20	54	13	41	27
160	40	M36x2	65	3/4"	M16x2,0	180	260	104,0	14	132	80	7	52	5	177	140	24	72	16	55	36
200	40	M36x2	75	3/4"	M16x2,0	180	275	119,0	14	132	95	7	60	5	214	175	24	72	16	55	36

Catálogo 1001-6 BR

### Dimensões

Cilindros pneumáticos  
ISO - Série P1E

### Montagem por flange traseira - MF2



Ø cilindro	ZF	MF	R	ED	TF	UF	Ø FB	Peso (kg)	Referência
32	130	10	32	46	64	80	7	0,230	P1C-4KMBA
40	145	10	36	52	72	92	9	0,280	P1C-4LMBA
50	155	12	45	64	90	113	9	0,530	P1C-4MMBA
63	170	12	50	74	100	129	9	0,710	P1C-4NMBA
80	190	16	63	96	126	153	12	1,590	P1C-4PMBA
100	205	16	75	112	150	186	14	2,190	P1C-4QMBA
125	245	20	90	142	180	220	16	2,590	P1C-4RMB
160	280	20	115	190	230	275	18	4,800	P1C-4SMB
200	300	25	135	225	270	318	22	8,000	P1C-4TMB

Cilindros pneumáticos



## **Anexo L – Desenhos Técnicos**

Nas próximas páginas, estão apresentados os desenhos técnicos das seguintes peças:

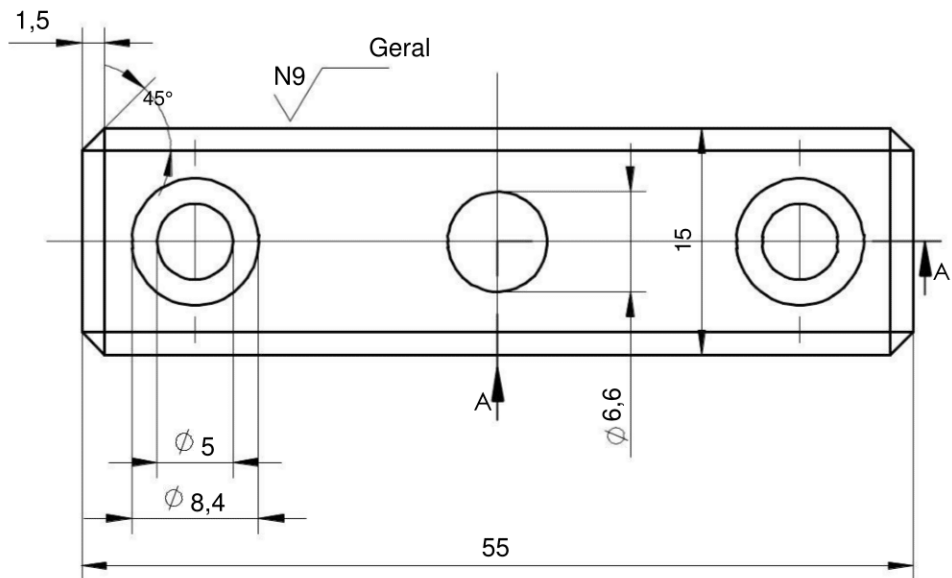
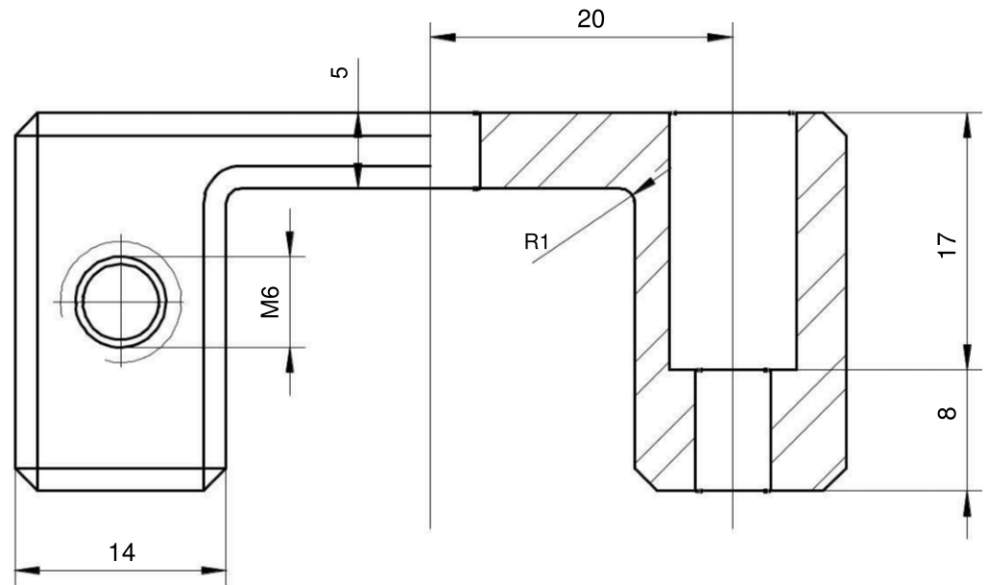
- Peça de suporte de comparadores;
- Peça de fixação das guias.





Projectou		04/09/17	FCT/UNL Dissertação em Engenharia Mecânica 2017	Afonso Nunes Mexia Allen Revez nº 40667
Desenhou		04/09/17		
Verificou		04/09/17		

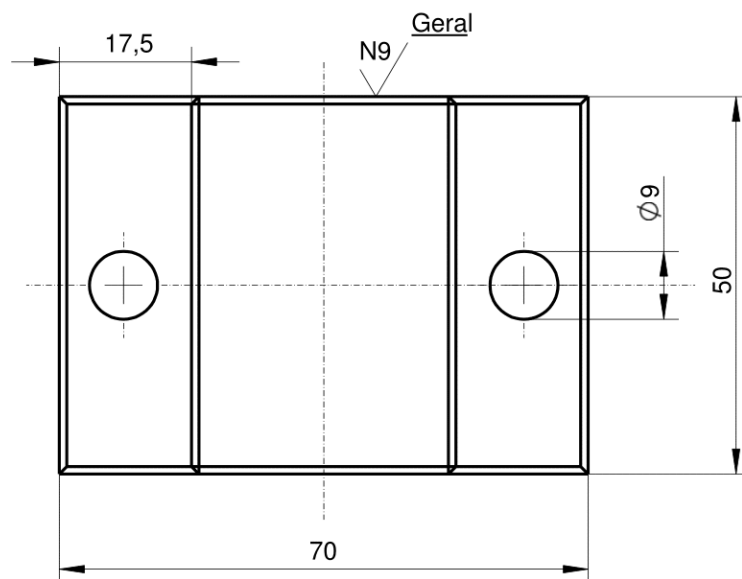
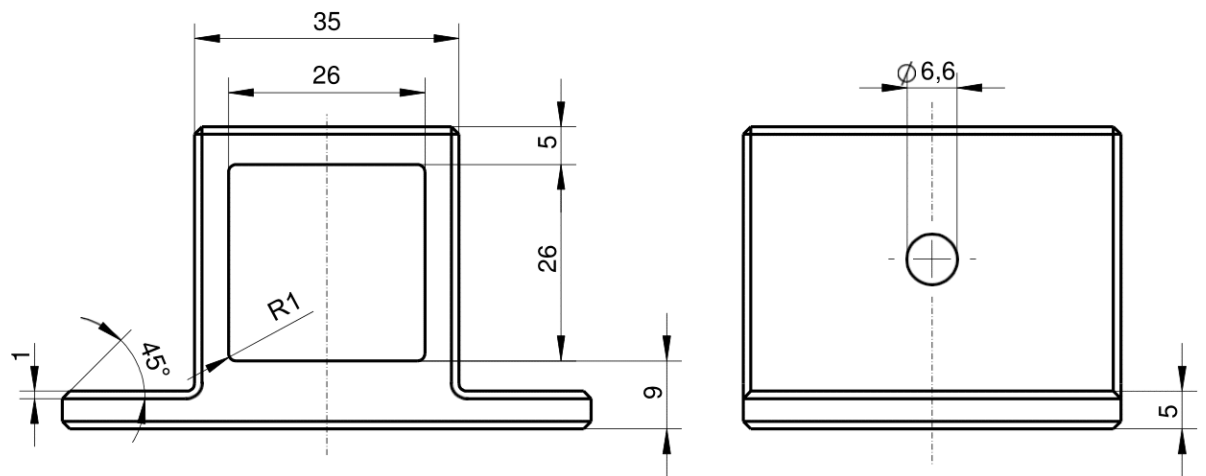
CORTE A-A  
ESCALA 2:1



	2:1	Peça de suporte de comparadores	Peça 01
	NP-265 Médio		



Projectou		04/09/17	FCT/UNL Dissertação em Engenharia Mecânica 2017	Afonso Nunes Mexia Allen Revez nº 40667
Desenhou		04/09/17		
Verificou		04/09/17		



	1:1	Peça de fixação das guias	Peça 02
	NP-265 Médio		

